



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria  
Industrial de Barcelona

Trabajo de Fin de Grado

## **Viabilidad de la implementación del sistema *M.A.F.F.S. II***

**Joan Fàbrega Ferrer**

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Junio 2018

Director TFG:

**Jordi Bou Serra**

## **Resumen**

El objetivo principal de este trabajo era desarrollar un estudio de viabilidad del sistema *MAFFS II*, motivado principalmente por los grandes incendios forestales que sucedieron durante el año 2017 en Galicia y Portugal, causando grandes catástrofes ecológicas, pérdidas materiales y vidas humanas.

Se trata de estudiar si los sistemas de gran capacidad de carga de retardante de llama en aviones antiincendios, son viables o no en el caso del protocolo español para la extinción de incendios. Se ha estudiado el tipo de descarga presurizado del sistema de estudio y se ha comparado con el *CL-215T*, observando que la descarga presurizada abarca una superficie mayor con un factor de cobertura de retardante por superficie mayor y que hace del sistema *MAFFS II* una gran herramienta para crear largos cortafuegos.

También se ha estudiado que tipo de estrategias se deberían seguir en un incendio utilizando dicho sistema para obtener el mayor rendimiento, junto a un plan de actuación, rango de alcances y tipos de descargas más eficientes según la capacidad del tanque que se quiera descargar.

Al final del estudio de viabilidad, se ha concluido que el sistema *MAFFS II* es una gran herramienta para extinguir incendios que se consideren como catástrofes naturales o incendios descontrolados y que como medida excepcional con el protocolo desarrollado sería viable la adquisición de una unidad. A niveles de coste operativo, también se ha determinado que el avión anfíbio *CL-215T* es más económico y como avión de extinción de incendios es el más viable para España, ya que el sistema *MAFFS II* no se podría usar como medida regular de extinción debido a su alto coste de explotación, que varía en función de la distancia al fuego y el retardante usado como se verá en el punto de análisis económico.

# Índice

<b>1. Introducción.....</b>	<b>5</b>
1.1. Origen y motivación del estudio .....	5
1.2. Alcance del estudio .....	6
1.3. Requerimientos previos.....	7
<b>2. Objetivos .....</b>	<b>8</b>
<b>3. Contextualización.....</b>	<b>9</b>
3.1 Incendios forestales .....	9
3.1.1 Introducción .....	9
3.1.2 Influencia de los combustibles vegetales en incendios forestales .....	11
3.1.3 Procesos de propagación de las llamas .....	13
3.1.4 Partes de un incendio .....	14
3.1.5 Clasificación de los incendios forestales.....	15
3.2 Incendios forestales en España en las últimas décadas .....	18
3.2.1 Clasificación de las causas de los incendios forestales de España.....	19
3.3 Uso de medios aéreos en incendios forestales.....	20
3.4 Equipos y materiales específicos para sofocar incendios forestales .....	22
3.4.1 Unidades aéreas.....	24
3.4.2 Unidades terrestres .....	28
3.4.3 Retardantes de llama .....	29
3.5 Estado del arte de la extinción de incendios por aire .....	31
3.5.1 Tipología de operaciones .....	31
3.5.2 Operaciones conjuntas de extinción.....	35
3.6 Descripción del sistema MAFFS II .....	38
3.6.1 Descripción de la aeronave portadora.....	38
3.6.2 Introducción del sistema MAFFS II.....	39
3.6.3 Partes del sistema .....	40
3.6.4 Funcionamiento .....	42
<b>4. Análisis técnico del sistema MAFFS II .....</b>	<b>44</b>
4.1 Potencial de extinción .....	44
4.1.1 Formación de circuitos de noria .....	44

4.1.2 Caducidad y cadencia de las descargas.....	47
4.1.2.1 Cadencia de las descargas del sistema MAFFS II .....	47
4.1.3 Tiempos en seco sobre la vertical del incendio .....	51
4.1.3.1 Límites operativos del C-130 con el sistema MAFFS II.....	52
4.2 Análisis de las descargas .....	54
4.2.1 Introducción teórica.....	55
4.2.2 Análisis de las descargas del MAFFS II .....	57
4.3 Creación del plan logístico de intervención .....	65
4.3.1 Protocolo MAFFS II.....	65
4.4 Simulación de una actuación del sistema MAFFS II .....	69
4.5 Impacto ambiental .....	71
4.5.1 Impacto ambiental del sistema MAFFS II.....	71
4.5.2 Impacto ambiental de los retardantes a largo plazo .....	73
<b>5. Análisis económico.....</b>	<b>75</b>
5.1 Estudio de mercado .....	75
5.2 Presupuesto general .....	76
5.2.1 Costes de adquisición del sistema .....	76
5.2.2 Costes del estudio de viabilidad.....	77
5.3 Costes de implementación del proyecto MAFFS II .....	77
5.3.1 Coste del sistema por depósito descargado .....	78
5.3.2 Análisis de costo-efectividad.....	79
5.3.3 Potencial económico de extinción .....	81
5.3.4 Comparación de costes con el sistema actual .....	82
<b>6. Conclusiones .....</b>	<b>84</b>
<b>7. Agradecimientos .....</b>	<b>86</b>
<b>8. Bibliografía .....</b>	<b>88</b>

## 1. Introducción

### 1.1. Origen y motivación del estudio

Debido al cambio climático y al incremento de las sequías, existe un aumento del número de incendios forestales a causa de la sequedad que existe en los bosques. Se estima que los incendios forestales son los causantes de la quinta parte <sup>[34]</sup> del auge de las emisiones de CO<sub>2</sub> a parte de la deforestación y destrucción de flora y fauna. Actualmente en España los medios para luchar contra los incendios forestales se basan en unidades aéreas y terrestres.

En el caso de las unidades aéreas, los medios de extinción vienen constituidos por helicópteros con *bambi buckets* <sup>1</sup> o depósitos internos y aeronaves de ala fija, que en su mayor parte son aviones anfibios adaptados con cisternas para cargar agua y en algunos casos retardantes de llama. También existen aeronaves de tipo comercial o pasajeros o aviones de carga militares de gran capacidad adaptados para sumarse a la lucha. En los EE.UU. actualmente, se ha dotado a la Guardia Nacional, encargada de la extinción de incendios, del **Modular Airborne FireFighting System II**, que se basa en un sistema modular que se carga en aviones militares de carga (en específico el *Lockheed C-130 Hercules*, y todas sus variantes) que lo habilita temporalmente para extinguir fuegos, sin realizarle modificaciones estructurales.

Es debido a este pretexto que surge la motivación del estudio, ya que las Fuerzas Aéreas Españolas disponen actualmente de 13 unidades<sup>2</sup> de C-130 que son las aeronaves que pueden utilizar y cargar en su interior el sistema *MAFFS II*, que su implementación podría evitar el despliegue de una gran cantidad de efectivos, aprovechando las aeronaves de carga españolas dotándolas de la capacidad de extinguir fuegos temporalmente. Al ser un sistema modular, se puede cargar el sistema y tener el avión operativo en una hora, sin modificar estructuralmente el avión.

---

<sup>1</sup> Cesta confeccionada con material resistente para cargar agua

<sup>2</sup> Según fuentes oficiales

## 1.2. Alcance del estudio

En este proyecto se van a establecer las bases y posibles futuras directrices para poder implementar el sistema *MAFFS II*, ya implementado en otros países. Al tratarse de un estudio de viabilidad, se analizarán todas las alternativas existentes para poder desarrollar un plan logístico viable económicamente. A continuación se describen brevemente los aspectos desarrollados en el proyecto.

- Para introducir la temática, se hace una introducción a la operativa de extinción de incendios y coordinación de medios.
- Se analizan las alternativas en un estudio de mercado comparándolas con las necesidades de extinción de incendios con los medios ya existentes.
- Se desarrolla un estudio técnico del sistema solución, analizando sus características técnicas y sus beneficios respecto a otras soluciones.
- Se analiza el coste económico de la implementación del sistema al programa de lucha contra incendios español del MAPAMA<sup>3</sup>.
- Se desarrollan posibles planes logísticos de la implementación del sistema, con número de unidades, mapa de situación y alcance de sus aeronaves portadoras con un radio de acción mejorado.
- Se estudia la mejoría del sistema con la utilización de retardantes químicos y el impacto medioambiental de estos.

---

<sup>3</sup> Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente

### 1.3. Requerimientos previos

En el ámbito de normativa y legislación, por lo que a las aeronaves de extinción de incendios se refiere, existe en el marco legal un Real decreto que deben cumplimentar todas las aeronaves que se dediquen de forma temporal o a tiempo completo a dicho propósito. En este Real Decreto 750/2014 publicado en el Boletín Oficial del Estado, solamente se regulaba la participación de empresas privadas, sus pilotos y aeronaves para la lucha contra incendios forestales, obligando éstas a cumplimentar la normativa que regula la seguridad aérea europea impuesta por la *European Aviation Safety Agency*. Esta agencia Europea para la Seguridad Aérea, solamente regula las aeronaves de tipo comercial o que pertenezcan a una empresa que las explote con la finalidad de obtener una retribución económica, para cualquier uso, ya sea para vuelos comerciales, agrícolas o de extinción de incendios.

Por lo que respecta a las aeronaves de ámbito militar, que pertenecen a una fuerza aérea o cualquier otro organismo del estado relacionado con el sector de defensa, éstas están exentas de cumplimentar el Real Decreto mencionado anteriormente, ya que solo regula aeronaves comerciales y también están exentas de cumplimentar la normativa europea, ya que la *EASA* especifica que dichas aeronaves de ésta índole militar deberán cumplimentar solamente las leyes aeronáuticas del propio país u organismo que lo regule, que en este caso, para el C-130H al ser una aeronave militar, es el Ministerio de Defensa.

Para este proyecto en concreto, la aeronave portadora o a estudiar para el sistema *MAFFS II*, es el *Lockheed C-130 Hercules*. Dicha aeronave tiene una historia extensa dentro del Ejército del Aire, ya que la incorporación de la primera unidad fué el 18 de diciembre de 1973 bajo la denominación de T-10. Es por este motivo que dicha aeronave ya cumplimenta todas las normativas del organismo regulador, aunque éste no especifica ni regula ningún tipo de actividad como para la que está diseñado el sistema *MAFFS II*.

La única certificación que tiene dicho sistema para su uso generalizado, la obtuvo del *United States Forest Service* en julio de 2010, con la pertinente aprobación del organismo regulador americano, la *Federal Aviation Administration*, que otorga los permisos y certificaciones de aeronavegabilidad dentro de territorio americano.

## **2. Objetivos**

El principal objetivo de este proyecto es evaluar si la implementación del sistema *MAFFS II* en las campañas de lucha contra incendios de este país sería viable tanto a nivel económico, técnico o logístico. Cabe remarcar, que la tarea de extinguir incendios es responsabilidad del estado o de las comunidades autónomas, con que no se esperará una retribución económica del sistema, pero sí que se contemplará la mayor efectividad con el mínimo coste de explotación e inversión.

El problema que se contempla resolver con la implementación de dicho sistema, es la incorporación de aeronaves de extinción de incendios con gran capacidad de carga, minimizando su coste de inversión, aprovechando así el uso de aviones de carga que ya forman parte de la flota del Ejército del Aire. Estas aeronaves, serían de gran ayuda en incendios de grandes dimensiones, para ayudar a controlar o sofocar grandes superficies de terreno mediante grandes descargas de retardantes de llama.

Se estudiará también en qué ocasiones determinadas dicho sistema se debería usar; Ya sea por el tipo de fuego, dimensiones, topografía del terreno afectado y qué estrategias se debería seguir con la coordinación de medios terrestres y otros efectivos aéreos.

Es por este motivo también, que la principal intención será ver el sistema *MAFFS II* como una herramienta más dentro plan contra incendios actual comparando así su coste operativo y eficacia con los medios aéreos actuales.



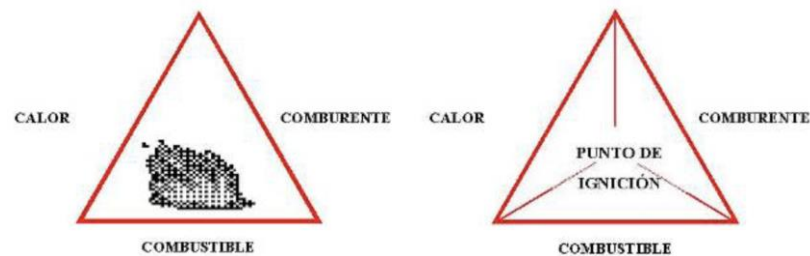
### 3. Contextualización

#### 3.1 Incendios forestales

##### 3.1.1 Introducción

Los incendios forestales, son la consecuencia de una reacción química de oxidación rápida, una combustión de material vegetal que consume oxígeno y produce dióxido de carbono y vapor de agua. Dichos incendios son aquellos que se desarrollan en una masa vegetal forestal, que puede estar conformada por arboledas, matorrales y otros tipos de vegetación que se comentarán al clasificar el tipo de fuego forestal según el tipo de combustible vegetal del que se nutra.

Dicha reacción de combustión se da cuando se propician las condiciones ideales, que se rigen por el llamado triángulo del fuego y del cual se puede obtener la reacción de combustión:

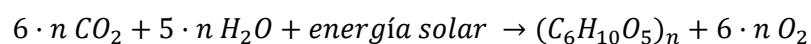


*Figura 3.1.1:* Representación gráfica del triángulo del fuego [27]

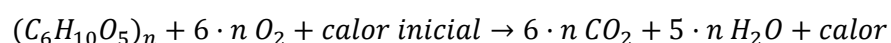
En este triángulo, se representa gráficamente cuales son los pilares básicos para crear las condiciones que propician la reacción de combustión, favoreciendo la aparición del punto de ignición: sería el baricentro o centro de masas del triángulo del fuego, es decir, la mezcla perfecta de combustible, comburente u oxidante y la aportación de energía necesaria para prender inicialmente.

El combustible en el caso de los incendios forestales, se basa en todos los productos que obtiene la vegetación del proceso de la fotosíntesis u otros derivados vegetales de su descomposición, tales como celulosa, lignina, resinas, etc.

##### Fotosíntesis



##### Combustión



En el proceso de combustión, existirán seis fases desde que el material vegetal o combustible está inerte hasta que ya ha prendido y ha quemado por completo. Las tres primeras son previas al paso de las llamas, la 4 es propiamente el frente del fuego y las dos últimas son las fases posteriores al paso de las llamas:

- **Fase 1) Calentamiento previo:** La temperatura del combustible asciende ya sea por la radiación solar o por el avance de las llamas de un incendio, provocando que la masa vegetal pierda su humedad interna en forma de vapor de agua y que se deshidrate el combustible, deshidratando así el combustible vegetal.
- **Fase 2) Pirólisis:** Es el proceso que se da cuando la madera o masa vegetal se calienta hasta una temperatura aproximada de 300 °C que inicia una descomposición química de la materia orgánica, cambiándola de color, liberando gases inflamables y degradando su materia hasta crear carbón vegetal. Cuanto más afecta dicha fase a la madera, más profundiza esta descomposición hasta el núcleo interior.
- **Fase 3) Autoinflamación:** La madera produce suficientes gases inflamables como para empezar una combustión gaseosa, pero para que se produzca se necesita un agente que de la energía suficiente como para prender o proporcione una llama a dichos gases. Si este agente no se da, pero aumenta la temperatura lo suficiente, se dará la fase de auto-inflamación o ignición espontánea.
- **Fase 4) Combustión gaseosa:** Fase en la que se dan las llamas, pero estas evitan el contacto entre el combustible sólido y el oxígeno, ya que es el calor de la llama que por radiación da la energía suficiente como para que se acelere la pirolización. Las temperaturas son de entre 600 °C y 1000 °C, aunque a veces se supera dicho rango.
- **Fase 5) Combustión sólida:** Fase en la cual se extinguen las llamas pero perduran las brasas a altas temperaturas, con el progreso de la combustión avanza hacia el interior, crece el grosor de la capa carbonizada y disminuye la pirólisis por la reducción de masa vegetal disponible para quemar. Al disminuir la pirólisis, no se puede mantener el proceso de combustión gaseosa, ya que es la capa de material carbonizado que está en contacto directo con el comburente.

- **Fase 6) Enfriamiento:** Fase en la que el material libera el exceso de calor después de la combustión.

### ***3.1.2 Influencia de los combustibles vegetales en incendios forestales***

Por lo que se refiere a los fuegos que consumen combustibles forestales, se puede analizar su propagación según el tipo de combustible al que afecta, desde un punto de vista macroscópico ya que el tipo de combustible definirá el comportamiento del mismo. Desde un punto de vista microscópico, el combustible forestal se clasificará según los diferentes tejidos vegetales de los que esté compuesto la flora que consume el incendio forestal, los cuales son distintos dependiendo de la parte de la planta y cada uno tiene unas propiedades que afectarán de distinto modo al comportamiento y propagación del fuego.

#### ***3.1.2.1 Tejidos que componen los combustibles forestales***

Analizando los combustibles forestales a nivel microscópico se distinguen los distintos compuestos orgánicos de los que se conforman principalmente la madera que es el combustible principal en un incendio forestal:

- ***Celulosa***

La celulosa es el principal polisacárido estructural de las plantas, de fórmula  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , con un calor de combustión de  $16 \cdot 10^3$  kJ/kg. Se trata de una cadena lineal y nunca ramificada.

- ***Hemicelulosa***

La hemicelulosa también es un carbohidrato, pero de cadena más corta que la celulosa ya que no se forma a base de glucosas sino que se forma a base de pentosas y hexosas. Tiene el mismo calor de combustión que la celulosa de  $16 \cdot 10^3$  kJ/kg.

- ***Lignina***

Es el compuesto que da dureza a la madera. Se trata de un polímero aromático de cadena ramificada. Su calor de combustión es de  $24,4 \cdot 10^3$  kJ/kg. Este compuesto, contribuye menos a la propagación del incendio ya que solamente se volatiliza la mitad aproximadamente del

compuesto y permanece en la quema incandescente en forma de brasa. En los combustibles vegetales ya quemados existe más lignina que celulosa.

- **Terpenos y Resinas**

Los terpenos son hidrocarburos polímeros del isopropeno, de fórmula  $(C_5H_8)_n$ , con bajo punto de ebullición y de fácil volatilización. Su contenido en hojas y tallos es menos de un 2%. Las resinas, en cambio se consideran compuestos pocos volátiles, ya que se conforman principalmente por ácidos grasos, ácidos resínicos y fitoesteroides. Los terpenos y resinas se consideran conjuntos y tienen un calor de combustión de  $32,2 \cdot 10^3$  kJ/kg.

- **Minerales o contenidos en cenizas**

Son compuestos minoritarios en la composición de los combustibles vegetales pero influyen en el proceso de combustión, ya que un vegetal rico en minerales arde con más dificultad que uno que sea pobre en ellos. Actúan como catalizadores en el proceso de la pirólisis, favoreciendo a la formación del carbón.

### **3.1.2.2 Comportamiento del fuego según el combustible y su disposición**

Las siguientes propiedades son las más importantes al determinar la intensidad y velocidad de propagación del fuego:

- **Carga de combustible**

Es la cantidad de combustible vegetal medida en base seca que existe sobre la superficie, medida en toneladas por hectárea. Al medir en base seca, permite comparar las cantidades independientemente de las distintas especies.

- **Tamaño y forma del combustible**

Se mide la relación de superficie/volumen ( $m^2/m^3$ ), con la letra  $\sigma$ . Al ser difícil de concretar, dicho combustible que se asocia a una forma cilíndrica, sigue la siguiente fórmula:

$$\sigma = \frac{4}{d}$$

$\sigma$ : Relación superficie-volumen, [ $m^2/m^3$ ]

d: Diámetro, [m]

- **Compactación y densidad aparente**

La compactación de un combustible vegetal se mide con la densidad aparente, ya que ésta considera la cantidad de material que hay en un volumen determinado incluyendo el aire dentro del mismo, así se puede cuantificar la porosidad del material. Cuanto más compactado está el material, más difícil es la propagación del fuego.

$$\beta = \frac{\rho_B}{\rho}$$

$\beta$ : Relación de empaquetamiento, [-]

$\rho_B$ : Densidad aparente, [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho$ : Densidad del material, [kg/m<sup>3</sup>]

- **Disposición del combustible**

La disposición del combustible vegetal sobre el terreno es muy importante para la propagación del fuego. Hay dos tipos de disposición: vertical y horizontal. En la disposición horizontal, si son troncos caídos, la propagación se dificulta si existe distanciamiento entre ellos. En la disposición vertical, la propagación se facilita por el contacto directo o cercano de copas de árboles.

### ***3.1.3 Procesos de propagación de las llamas***

En el proceso de avance de las llamas, existen tres procesos por los que el frente del fuego de un incendio se propaga:

- **Radiación:** Es el tipo de propagación que se basa en la transmisión de calor en forma de onda a través del aire sin necesidad de calentarlo. Es el causante directo de la desecación de la materia vegetal colindante al frente del fuego, que propicia la anterior mencionada pirólisis causante de la ignición. La radiación solar puede hacer que el frente deba ceder menos calor en forma de radiación, siendo así más fácil la propagación de las llamas.

Es este tipo de avance, también el más fácil de controlar por los efectivos terrestres debido a su progresión continua, ya que con un pequeño cortafuegos se puede detener su avance.

- **Convección:** Se basa en el principio de convección de conducción del calor. Las llamas ceden la mayoría de su potencia calorífica al aire por convección, creando unas columnas de gases de combustión y de gases inflamables no combustionados a altas temperaturas. Estas columnas o nubes convectivas, son muy peligrosas debido a su gran capacidad de transferencia de calor de forma ascendente y a que su avance es muy difícil de prever por su alta volatilidad.

La mayoría llamas emiten calor lateralmente por radiación mientras que lo emiten por convección de forma vertical. Por esta razón, este tipo de transferencia puede saltar cortafuegos o impedimentos que efectivos terrestres puedan efectuar, con que los hace más impredecibles, caóticos y difíciles de controlar.

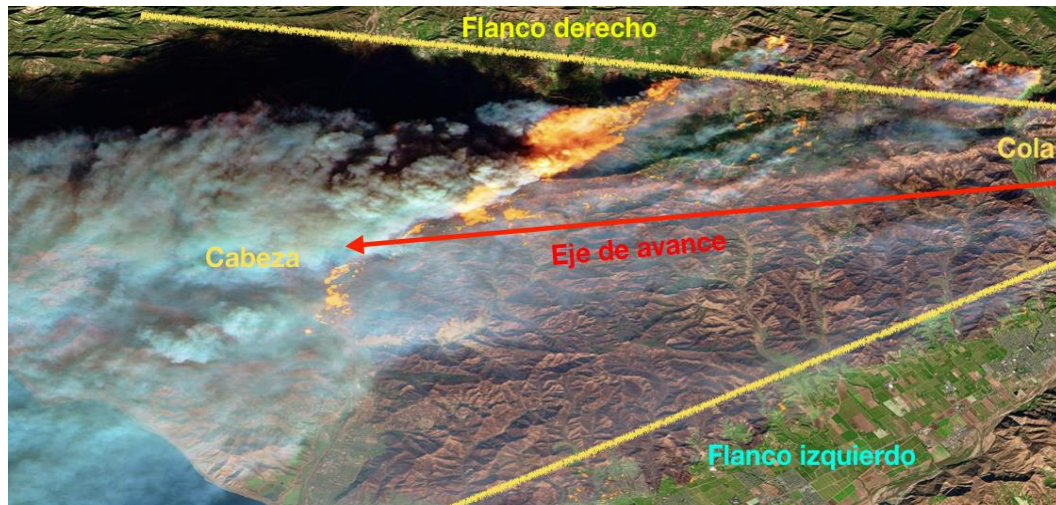
Existirán dos tipos de convección según el tipo de flujo que les afecte: la natural o la forzada. La forzada será cuando exista un fuerte viento en el incendio, mientras que la natural será aquella que aparecerá en incendios con poco viento o inexistente.

- **Conducción:** Este es el proceso menos importante dentro de la propagación de frentes en incendios forestales, ya que es la conducción de calor por contacto directo. Como la madera es un mal conductor térmico hará que se minimice la propagación por este fenómeno, aparte de que será el más lento pero el que se deberá tener en cuenta una vez el incendio esté controlado, ya que este no es visible y puede provocar la confusión de que el incendio parezca sofocado aunque no lo esté.

### ***3.1.4 Partes de un incendio***

En un incendio forestal se pueden distinguir distintas partes según la propagación del frente del fuego. El punto dónde se ha originado el fuego o zona cero se le atribuyen el nombre de “cola del fuego”, y si se traza un eje imaginario desde la cola del incendio siguiendo el avance del fuego, se podrá encontrar la cabeza del incendio. Visualizando la cabeza desde la cola, se podrá diferenciar el flanco izquierdo y derecho, cada uno en sus respectivos extremos respecto al eje imaginario de avance del frente.

En la zona que se encuentra delante de la cabeza, es la zona de desecación dónde debido a la radiación y convección de la cabeza del incendio se encontraría entre las fases de calentamiento y pirólisis de la combustión.



*Figura 3.1.3:* Esquema de las partes de un incendio forestal [elaboración propia]

### **3.1.5 Clasificación de los incendios forestales**

Cada incendio forestal es único debido a todos los parámetros de los que depende su ignición y desarrollo. Es por este motivo, que existe una clasificación del fuego según sus factores determinantes:

- **Según la forma del fuego en la cola o zona 0**

La forma de la zona 0 donde se ha originado el fuego, determinará el comportamiento del incendio forestal. La interpretación correcta del inicio de dicho fuego determinará qué tipo de ataque o método de extinción concreto se le deberá aplicar de forma más eficaz posible.

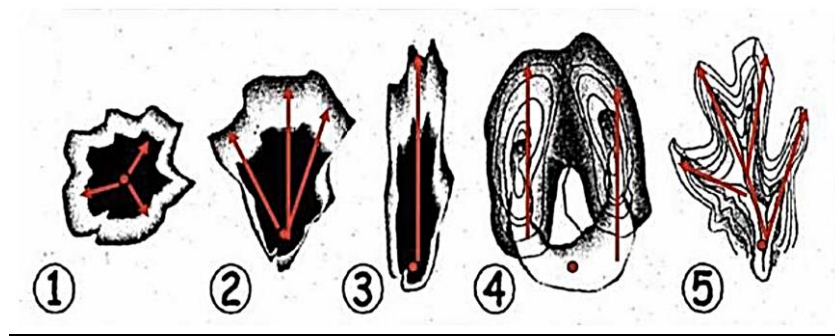


Figura 3.1.4: Tipo de forma de inicio de fuego forestal [27]

En la figura 3.1.4, se aprecian las distintas morfologías de colas o inicios de incendio:

1. Incendios donde los efectos del viento y las pendientes no son importantes.
2. Incendios donde los efectos del viento y/o la pendiente dominan.
3. Incendio dirigido por un viento fuerte.
4. Incendio sobre crestas. Predominará el efecto del viento.
5. Incendios en barrancos o valles. Las nubes de convección o vientos característicos de la zona dominarán el avance.

- **Según el combustible que le afecta**

Se calificarán según el tipo de combustible que alimenta el incendio forestal:

- **Fuegos de subsuelo**

Son aquellos fuegos que consumen la materia vegetal u orgánica que existe debajo de la superficie, ya sean raíces, viejas ramas, hojas en descomposición o incluso viejas canteras de carbón vegetal. Su detección es complicada ya que simplemente se ve el humo que desprende. Son de baja intensidad pero pueden durar días, semanas o meses.

- **Fuegos de superficie**

Son aquellos fuegos que consumen toda aquella materia orgánica que reside sobre la superficie del terreno, como hojarasca, ramas, matorrales u otros tipos de pequeñas plantas. Este tipo de fuego, se puede evitar con las labores previas a las campañas contra incendios, retirando la mayor cantidad de residuos vegetales que existen directamente sobre el terreno. De este modo, si un incendio llega a una zona donde la



superficie esté limpia de combustible puede hacer reducir la fuerza e intensidad del mismo.

– **Fuegos de copas**

Son aquellos que queman las copas de los árboles, independientemente de los de superficie. Se pueden distinguir tres tipos:

- **Antorcheo de copas:** Aquellos donde las copas de los pinos prenden debido a radiación puntual o convección del fuego de superficie circundante a la copa del árbol.
- **Fuego pasivo de copas:** Aquellos en que el fuego de superficie es el encargado de propagar el fuego, hace que la copa y los matorrales circundantes quemen al unísono.
- **Fuego activo de copas:** Aquellos en que el fuego de superficie quema y se propaga independientemente del fuego de las copas. Es el más difícil de controlar, ya que tiene una alta velocidad de propagación de llama.

• **Según el patrón del incendio**

El avance del incendio lo limita y guía el tipo de combustible, la topografía del terreno y el viento que lo dirige. Un mismo incendio puede presentar varios patrones de desarrollo en distintos flancos del mismo. Existirán distintos patrones según el tipo de fuego:

– **Fuegos de combustible**

Son aquellos que son guiados por las acumulaciones de combustible vegetal existente. Una vez se acaba el combustible o varían las condiciones meteorológicas, facilita la posibilidad de extinguir el incendio.

– **Fuegos de topografía**

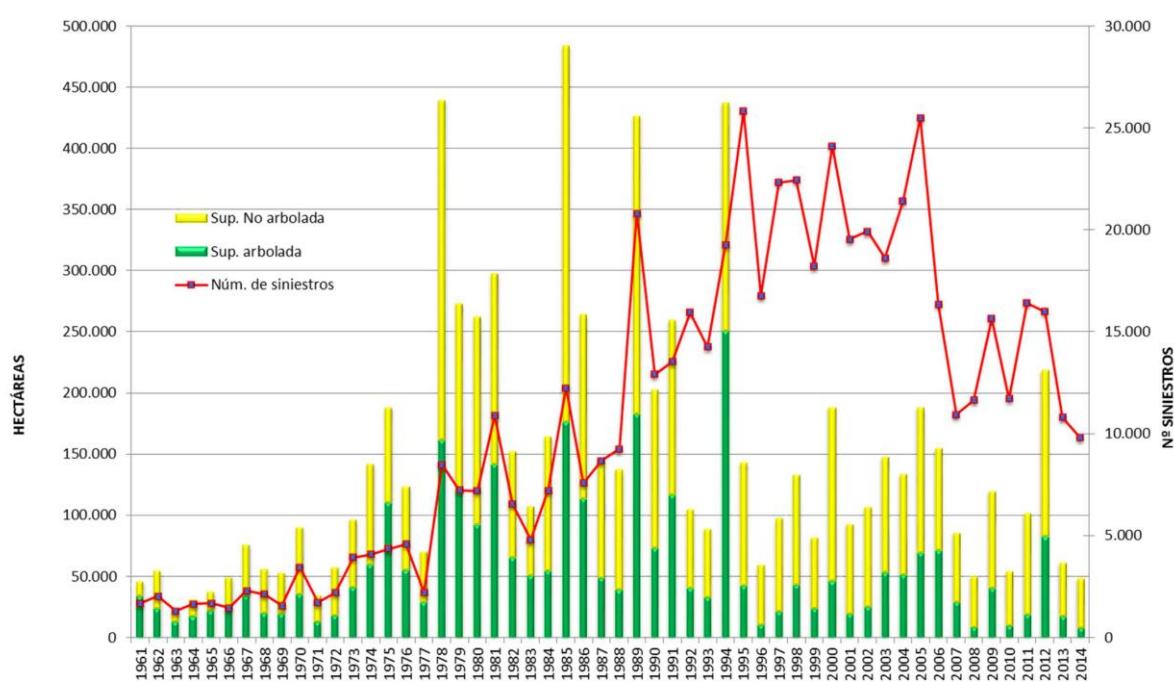
Son los incendios en los cuales los vientos topográficos de la zona y la pendiente del terreno serán los factores principales de comportamiento y guiado del mismo.

— **Fuegos dirigidos por viento**

Son incendios que están dirigidos por la dirección y fuerza del viento, siempre tendrán el mismo sentido del viento y serán de rápido avance, según la intensidad y constancia del viento.

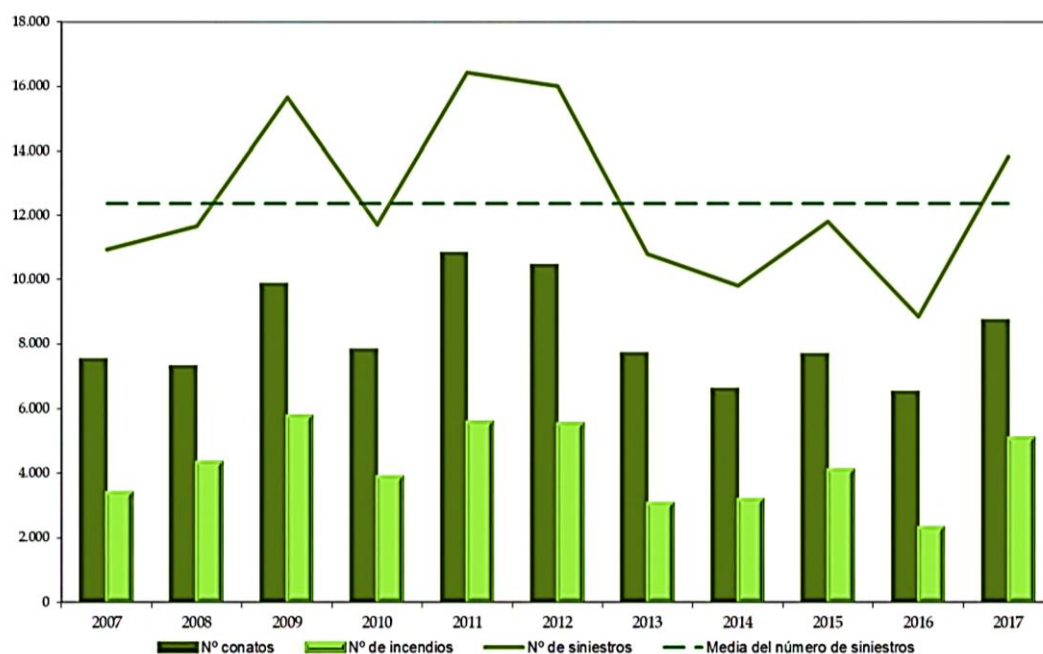
### 3.2 Incendios forestales en España en las últimas décadas

En las últimas décadas, desde que se tiene registro de datos sobre incendios forestales en este país, se ha podido observar un creciente número de siniestros o incendios a nivel estatal. Este aumento se debía en parte a que en la época de los años sesenta y setenta no había las herramientas o la conciencia de lo importante que sería la toma de datos en este ámbito. La tendencia del número de siniestros es creciente, como se puede observar en la *figura 3.2.a*, debido al aumento de las sequías en las estaciones estivales y la sequedad de la masa forestal del país a causa de las escasas lluvias. A partir del año 2005, se puede observar que la siniestralidad disminuye debido al incremento de efectivos y del presupuesto en la lucha contra incendios, posicionando a España como uno de los países líderes y referentes en este ámbito.



*Figura 3.2.a:* Gráfico del número de siniestros de las últimas cinco décadas [3]

En cambio, podemos observar la tendencia oscilatoria del número de siniestros en la *Figura 3.2.b*, mostrada a continuación, que se debe a los cambios entre año y año de factores como la sequedad de las masas forestales, la humedad relativa, el calor relacionado con la intensidad de la radiación solar u otros factores meteorológicos.



*Figura 3.2.b:* Gráfico del número de siniestros de los últimos diez años [3]

### 3.2.1 Clasificación de las causas de los incendios forestales de España

Dentro de los siniestros anuales, cabe remarcar que existen distintos motivos causantes de los incendios forestales. Los dos predominantes como se muestra en la *figura 3.2.1* son las negligencias o accidentes y los incendios intencionados, ésta última ha sido la mayor causante de siniestros en las últimas décadas.

Causa	Nº de siniestros			Nº de causantes identificados	Superficies			
	Tipo de causa		Total		Vegetación leñosa		Vegetación herbácea	Total forestal
	Cierta	Supuesta			Arbolada	No Arbolada		
Rayo	6.576	923	7.499	7.499	37.175,67	35.377,12	10.762,15	83.314,94
Quema agrícola	4.972	3.810	8.782	2.658	11.100,24	11.252,31	5.821,67	28.174,22
Quema para reg. pastos	2.066	3.168	5.234	428	2.854,00	20.742,89	7.082,97	30.679,86
Trabajos forestales	1.434	532	1.966	1.158	3.844,68	3.822,31	883,27	8.550,26
Hogueras	1.019	700	1.719	418	14.364,77	6.390,61	2.014,35	22.769,73
Fumadores	979	2.277	3.256	140	6.645,37	7.838,85	2.848,50	17.332,72
Quema de basuras	864	841	1.705	278	2.902,06	5.041,83	1.814,32	9.758,21
Escape de vertedero	732	407	1.139	1.073	1.733,66	3.905,45	1.903,13	7.542,24
Quema de matorral	1.298	1.576	2.874	308	1.507,73	5.198,96	528,52	7.235,21
Ferrocarril	603	368	971	971	3.721,84	3.323,67	2.159,31	9.204,82
Líneas eléctricas	1.616	559	2.175	2.175	9.144,87	9.234,21	4.763,20	23.142,28
Motores y máquinas	2.773	1.022	3.795	2.132	12.833,54	19.749,02	10.973,56	43.556,12
Maniobras militares	72	11	83	68	3.649,79	4.356,69	2.990,49	10.996,97
Otras	2.592	3.534	6.126	1.056	12.307,83	19.352,26	12.729,98	44.390,07
Neglig. y causas accidentales	21.020	18.805	39.825	12.863	86.610,38	120.209,06	56.513,27	263.332,71
Intencionado	17.167	76.322	93.489	1.428	222.724,80	388.198,07	65.544,92	676.467,79
Desconocida	26.267	0	26.267	1	26.060,04	54.112,49	18.001,87	98.174,40
Reproducción	1.584	2.158	3.742	3.703	6.102,12	8.915,34	1.258,40	16.275,86
TOTALES	72.614	98.208	170.822*	25.494	378.673,01	606.812,08	152.080,61	1.137.565,70*

Figura 3.2.1: Nº de siniestros según causa de ignición de la última década [3]

### 3.3 Uso de medios aéreos en incendios forestales

En las últimas décadas, se ha podido demostrar la efectividad de los medios aéreos en la lucha contra los incendios forestales debido a su velocidad, capacidad de descarga de grandes volúmenes de agua o líquidos retardantes de llama con gran precisión y a la gran ventaja táctica que dan al poder atacar el fuego desde el aire.

Dentro de las flotas de aeronaves contra incendios existen tres tipos generalizados: helicópteros, aviones anfibios y aviones de carga de agua o retardante en tierra. Recientemente, se han añadido los *drones* o vehículos aéreos no tripulados a dicha flota, pero por el momento solo se les da el uso de vigilancia y no de extinción.

Cada una de estas aeronaves, tiene su cometido específico y sus ventajas tácticas según el tipo de estrategia a seguir y la combinación o la coordinación de éstos, es fundamental. Los principales cometidos de estas aeronaves son:

- **Transporte:** Helicópteros que se encargan de trasladar a efectivos terrestres o a las llamadas brigadas aerotransportadas a lugares remotos de difícil acceso, que de otro modo sería casi inaccesible mediante vehículos terrestres. Dichos helicópteros, también llevan una cesta con la que cargarán agua y realizarán las descargas pertinentes de agua dónde su brigada de operarios la solicite.
- **Soporte a efectivos terrestres:** Ya sea por parte de aeronaves de ala fija con descargas de agua o retardante, o por parte de helicópteros que dan soporte logístico a dichos efectivos o si fuera necesario algún tipo de evacuación sanitaria.
- **Vigilancia y coordinación:** Los medios aéreos serán de gran utilidad para coordinar las labores de extinción desde el aire y tomar fotos para futuras investigaciones de los siniestros o para poder preverlos. También son muy efectivos para poder avistar posibles focos o incendios cubriendo grandes áreas de vigilancia.

Cabe remarcar la importancia de dichos medios, sobre todo a nivel de rapidez de intervención. Es por este motivo, que en el 56,34 % de los siniestros en los que participan, su llegada es anterior a los 30 minutos tras la detección y de un 73,67 % si consideramos los primeros 45 minutos como podemos observar en la *figura 3.3.a*, donde se muestra el número de siniestros en los cuales hay intervención de medios aéreos.

Tiempo de llegada (minutos)	Siniestros		Superficie forestal afectada		Tamaño medio del incendio
	Nº	%	(ha)	%	(ha)
Sin datos*	1.080	0,63	19.710,43	1,73	18,25
≤ 5	1.434	0,84	11.575,29	1,02	8,07
> 5 - ≤ 10	2.618	1,52	52.193,22	4,58	19,94
> 10 - ≤ 15	4.152	2,42	63.484,26	5,58	15,29
> 15 - ≤ 30	12.463	7,26	209.364,53	18,39	16,80
> 30 - ≤ 45	6.359	3,70	119.229,81	10,47	18,75
> 45 - ≤ 60	3.047	1,77	61.656,46	5,42	20,24
> 60 - ≤ 90	2.468	1,44	49.089,59	4,31	19,89
> 90 - ≤ 120	1.071	0,62	31.146,99	2,74	29,08
> 120	3.080	1,79	229.775,71	20,18	74,60
Sin intervención	133.948	78,00	291.259,91	25,58	2,18
<b>TOTALES</b>	<b>171.720</b>	<b>100,00</b>	<b>1.138.486,2</b>	<b>100,00</b>	<b>6,65 ha</b>

*Figura 3.3.a:* Nº de siniestros y tiempos de intervención entre 2001-2010 [3]

Cabe destacar también, que los medios aéreos solamente han intervenido en el 21,8 % de los siniestros entre los años 2001 y 2010, aunque la superficie cubierta o superficie tratada de árboles es del 86,5% de las hectáreas totales afectadas y la superficie forestal del 74,3%. Es ésta la principal razón por la que se usan dichos medios, por su alta eficiencia y su capacidad de cubrir grandes superficies en poco margen de tiempo, por eso su coste aunque elevado, está justificado al evitar mayores pérdidas de masa forestal y ecosistema.

Nº de siniestros	Siniestros con utilización de aeronaves	Aviones		Helicópteros		Aeronaves de coordinación
		Anfibios	Carga en tierra	Extinción	Transporte y extinción	
171.270	37.324	3.836	8.913	6.302	30.520	3.883
	(21,8 %)	(2,2 %)	(5,2 %)	(3,7 %)	(17,9 %)	(2,2 %)

*Figura 3.3.b:* Nº de siniestros y tipo de aeronave usada entre 2001-2010 [3]

Como se puede observar en la *figura 3.3.b*, dónde se muestra la participación de los medios aéreos en los siniestros ocurridos entre 2001 y 2010, la aeronave con mayor uso en todos los siniestros es el helicóptero con capacidad de carga y transporte de efectivos terrestres; Tan alta participación se debe a la gran versatilidad de la aeronave y a que son las primeras unidades movilizadas en las mayoría de incendios de pequeñas y medianas dimensiones.

### 3.4 Equipos y materiales específicos para sofocar incendios forestales

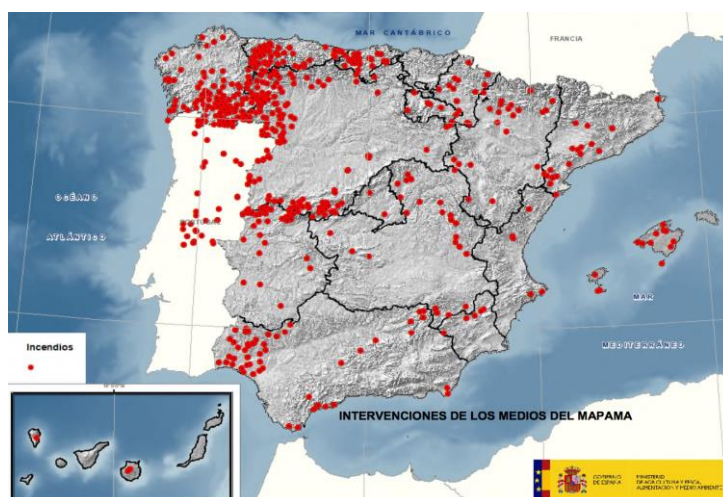
En las últimas décadas, la labor de extinción de incendios se ha ido perfeccionando dentro de las fronteras españolas, creando así un sistema de prevención y extinción de incendios referentes en el mundo. El resultado es, la creación de un dispositivo para las campañas contra incendios muy elaborado y bien distribuido en puntos estratégicos a lo largo del territorio español, como podemos observar en la *figura 3.4.a*.





*Figura 3.4.a:* Localización de los efectivos contra incendios en España [4]

Cabe remarcar, que como se puede observar en la *figura 3.4.b*, la localización de las intervenciones de los medios del MAPAMA, se adecuan a las localizaciones o bases de los efectivos aéreos y terrestres reduciendo así la distancia entre el foco del incendio y la base de partida. De este modo, también se reduce el tiempo de llegada de los efectivos a los incendios. Esta exactitud en los emplazamientos de dichos medios, se basa en el análisis estadístico de la localización de los siniestros ocurrido durante las cinco últimas décadas.



*Figura 3.4.b:* Localización de las intervenciones de los medios en España [3]

### 3.4.1 Unidades aéreas

Con el transcurso de los años, como se ha comentado anteriormente, se ha incrementado el apoyo aéreo en el proceso de extinción de incendios debido a su velocidad, eficacia y capacidad de extinguir incendios abarcando grandes superficies en llamas. Durante el año 2017, los medios aéreos del MAPAMA realizaron un total de 1.944 intervenciones en la extinción de incendios forestales. En total volaron 6.641 horas en incendio, realizando 30.401 descargas sobre los incendios.

Se debe remarcar que cada comunidad autónoma tendrá sus medios aéreos autónomos más aquellos subcontratados a empresas privadas, con que se centrará la atención en aquellos medios gubernamentales o que pueden actuar a nivel nacional. Entre dichas aeronaves, se pueden clasificar según sus características técnicas y según su capacidad de carga:

	Capacidad en litros
Clase I	>10.000
Clase II	5.000-9.000
Clase III	3.000-5.000
Clase IV	<3.000

*Tabla 3.1: Clasificación aeronaves según carga [1]*

Es por este motivo que una vez clasificadas según su capacidad de carga, es necesario clasificar las aeronaves existentes en el dispositivo actual del MAPAMA, según sus características técnicas para sus determinadas funciones teniendo en cuenta sus limitaciones a nivel táctico:

#### → **Aeronaves de ala fija**

##### ◆ **Carga en tierra**

En la última campaña contra incendios de 2017, solo se disponía de un tipo de avión que estaba obligado a llenar los depósitos de agua o retardante en aeródromos y bases aéreas pre habilitadas para ello, que era el *Air Tractor AT-802*. Es una adaptación de una versión comercial diseñada para la fumigación de cultivos u otros fines relacionados con



el sector agrícola. En la *tabla 3.2* se puede observar sus especificaciones técnicas más relevantes. Éste avión se puede clasificar como clase III.

<b>Air Tractor AT-802</b>	
Velocidad de crucero	296 km/h
Capacidad de carga	3.104 l
Régimen de ascenso	4,3 m/s
Autonomía    Alcance	4,4 h    1.287 km

*Tabla 3.2:* Especificaciones técnicas AT-802 [1]



*Figura 3.4.1.1:* Especificaciones técnicas AT-802 [26]

### ◆ **Anfibios**

Dentro de los aviones anfibios podemos distinguir entre ellos los de *clase II* o *III*:

#### ❖ **Clase II**

Como aeronaves de clase II, dentro del dispositivo del MAPAMA se distinguen las aeronaves del escuadrón 43 o 43 grupo de las fuerzas aéreas, que responde bajo el mando de la Unidad Militar de Emergencias, la cual asigna directamente las misiones de extinción. Dentro de dicha unidad se distinguen el *Canadair CL-215T* y el *CL-415*, ambos aviones anfibios de clase II. El 43 Grupo cuenta con 14 unidades en total.

	<b>CL-215T</b>	<b>CL-415</b>
Velocidad de crucero	291 km/h	140 km/h
Capacidad de carga	5.346 l (agua) 600 l (retardante)	6.137 l (agua) 680 l (retardante)
Régimen de ascenso	5 m/s	8,1 m/s
Autonomía    Alcance	6 h    2.260 km	8 h    2.440 km

*Tabla 3.3:* Especificaciones técnicas aviones 43 grupo [1]

Las dos aeronaves, en misiones de extinción, dependiendo de la exigencia de dicha misión pueden llegar a volar alrededor de 5 horas.



Figura 3.4.1.2 y 3.4.1.3: Imágenes del CL-215T izquierda y del CL-415 derecha [26]

### ❖ Clase III

Para las aeronaves de clase III, el MAPAMA únicamente dispone de un modelo de avión que cumple dichas especificaciones. Se trata de una variante del AT-802 anteriormente mencionado, pero éste está dotado de flotadores que le habilitan a realizar tomas de agua en reservas hídricas. El *AT-802F Fire Boss* tiene las mismas especificaciones que la versión de toma en tierra, pero los flotadores de éste lo ralentizan ya que es menos aerodinámico, su consumo de combustible por hora aumenta y reduce su tiempo efectivo de vuelo.

<i>Air Tractor AT-802F Fire Boss</i>	
Velocidad de crucero	140 km/h
Capacidad de carga	3.104 l
Régimen de ascenso	4,3 m/s
Autonomía    Alcance	3 h    982 km

Tabla 3.4: Especificaciones técnicas AT-802F [1]



Figura 3.4.1.4: Imagen de un AT-802F [26]

### → Helicópteros

En el caso de los helicópteros, como no son el principal competidor del sistema MAFFS II, simplemente se distinguirá entre los dos tipos de método de carga existentes en la flota española:

### ◆ **Carga por cesta**

Este tipo de carga de agua es el más utilizado debido a la simplicidad del método, sistema utilizado y todos los elementos móviles que se ven involucrados. Se basa en colgar una cesta llamada *Bambi Bucket* del gancho de carga del que disponen los helicópteros destinados a extinguir incendios, la cual está conectada con los mandos del piloto para poder activar la válvula de descarga. Existen distintas capacidades para toda la gama de cestas, que van desde los 270 litros a los 9.840 litros.

Ventajas	Desventajas
Rapidez de carga, según la pericia del piloto y la capacidad de la cesta	Dificultad de carga en reservas hídricas de poca profundidad
Coste de explotación reducido, debido a la simplicidad del sistema	Puede incrementar el mantenimiento y las revisiones estructurales del helicóptero
Sistema ligero, ya que no involucra grandes sistemas de control o transporte en su utilización.	Potencial siniestralidad del helicóptero debido a enganches de la cesta, sobre todo en zonas urbanas o postes eléctricos

*Tabla 3.5:* Ventajas y desventajas del proceso de carga por cesta



*Figura 3.4.1.5:* Imagen de un helicóptero Cougar con una *bambi bucket* [26]

### ◆ **Carga mediante bomba hidráulica**

Este tipo de carga, es menos común en los helicópteros de extinción de incendios en España, debido a su mayor complejidad de instalación y a que conlleva inutilizar el enganche de carga del helicóptero. Se basa en el llamado *belly tank*, que es la

traducción literal en inglés de tanque de barriga, ya que es un depósito instalado en la barriga o parte inferior del helicóptero.

Ventajas	Desventajas
Facilidad de carga en reservas hídricas con poca profundidad, menores a 1 metro	Velocidad de carga, dependerá del caudal de la bomba hidráulica, entre 50-90 segundos
Menor siniestralidad debido a enganche de la manguera con elementos como cables de tensión, telefonía, etc.	Incrementa la fatiga estructural del helicóptero debido al tiempo elevado de vuelo estático a gran potencia y par que debe proporcionar el motor por el elevado tiempo de carga
Menor derrame de carga, ya que es un depósito cerrado, sobre todo si se transporta retardante de llama.	Sistema más pesado que la <i>bambi bucket</i> e inutiliza el gancho de carga del helicóptero

*Tabla 3.6:* Ventajas y desventajas del proceso de carga con *belly tank*



*Figura 3.4.1.6:* Imagen de un AS-350 con *belly tank* [26]

### 3.4.2 Unidades terrestres

En la campaña de 2017 las Brigadas de Refuerzo en Incendios Forestales o BRIF trabajaron 5.617 horas en 455 intervenciones, realizando un total de 420.272 metros de longitud de frente combatido. Es por este motivo que las unidades terrestres son de relevante

importancia ya que son las que combaten el fuego desde primera línea y la coordinación aire-tierra debe ser perfecta para combatir eficientemente los incendios. Como las unidades terrestres no forman parte del objetivo del estudio simplemente se mencionarán.

Dichas unidades requieren de medios terrestres para poder sofocar, controlar o combatir los frentes. Es por esta razón que todos los medios que se consideran terrestres son aquellos que apoyan a los efectivos en la extinción de incendios, ya sean medios para facilitar la distribución de agua como vehículos autobomba, maquinaria pesada, u otro tipo de herramientas manuales, con motor o igníferas con dicha finalidad.

### **3.4.3 Retardantes de llama**

Actualmente los retardantes de llama son una de las mejores herramientas de contención y extinción de incendios existentes hasta el momento. Dichos retardantes de llama, son compuestos químicos que se mezclan con agua en determinadas proporciones, que al ser aplicadas sobre un área determinada reducen la capacidad ignífera del potencial combustible vegetal y dificultando sus posibilidades de arder con facilidad.

Dichos componentes químicos se clasifican según las propiedades de las que dotan al disolvente con el cual son diluidos, generalmente agua, en espumógenos, viscosantes y retardantes a largo plazo:

- **Espumógenos**

Dichos productos al ser mezclados con agua, producen gran cantidad de espuma, la cual aísla la vegetación dónde se aplica del oxígeno existente en el aire y del calor proveniente del frente del incendio. Éste tipo de retardante químico, activa la tensión superficial del agua proporcionándole la capacidad de penetrar en los tallos de vegetación dura llegando hasta su núcleo e hidratando la vegetación por dentro, reduciendo su combustibilidad.

Los espumógenos se caracterizan por ser biodegradables y por no ser corrosivos, haciendo de ellos una solución segura y amigable con el ecosistema del lugar. Se suelen aplicar en una mezcla de entre el 0,1% y 1% en volumen, aunque como norma se usa un valor medio de 0,6% en volumen.

- **Viscosantes**

Los viscosantes se caracterizan por dotar al agua de una capacidad viscosante hasta dejarla en unos 2.000 centipoise (cps), dificultando su evaporación debido al calor de las llamas. Al evitar la rápida evaporación del agua, se alarga el efecto humectante y refrigerante que tiene la misma sobre la vegetación. Se suelen mezclar al 1% en volumen y se suelen usar arcillas, gomas y polímeros en polvo. La cantidad a mezclar vendrá determinada por la dureza del agua con la que se mezcle, ya que la presencia de calcio y contenido salino del agua harán que para aguas duras (alto contenido salino) la mezcla puede resultar demasiado diluida y en aguas blandas (bajo contenido salino) puede suponer una disolución insuficiente y que resulte un sólido.

- ***Retardantes a largo plazo***

Este tipo de retardante en contacto directo con el calor crea residuos carbonados de combustión lenta que dificultan el avance del fuego disminuyendo o eliminando la llama en las áreas donde se hayan aplicado. Dichos retardantes están mayoritariamente compuestos por sales amónicas del grupo de sulfatos, fosfatos y polifosfatos. A parte de dichos componentes químicos, también se les añade viscosantes para causar el efecto anteriormente comentado, inhibidores de descomposición bacteriana, anticorrosivos para evitar el desgaste o corrosión de los tanques de los medios terrestres o aéreos y finalmente se les añade colorante en caso de ser distribuidos desde el aire para poder distinguir en qué zonas ha sido aplicado y cuales están húmedas.

Para poder ser transportados y utilizados deben cumplimentar requisitos de no toxicidad con certificación de inocuidad para el hombre o vegetación, mínima abrasión en los equipos de distribución y estabilidad de las propiedades del mismo hasta ser aplicado.

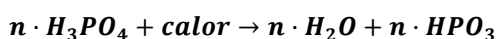
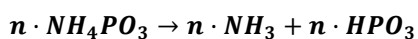
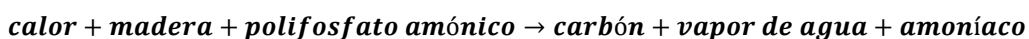
Los retardantes a largo plazo, deben su efecto ignífugo a la reacción química que sucede cuando se aplica el producto sobre el material vegetal.

Cómo se ha comentado con anterioridad, cuando un material celulósico es afectado por una fuente de calor, éste se descompone y se piroliza (descomposición del polímero en gases volátiles inflamables como alcoholes, cetonas, etc.), dando paso a la propagación del incendio debido a dichos gases. Con el producto aplicado sobre el material vegetal:

1. El polifosfato amónico se descompone en gas de amonio y ácido polifosfórico.

2. El ácido polifosfórico deshidrata los grupos hidroxilo del material celulósico, dejando un residuo carbonoso no inflamable y se convierte en ácido ortofosfórico.
3. La celulosa no emite gases inflamables ya que se ha descompuesto en un residuo carbonoso sin que haya habido llama.
4. El ácido ortofosfórico se convierte en polifosfórico liberando agua en caso de que la fuente de calor persista.
5. El ácido polifosfórico sigue la reacción del paso 2 si hay una fuente de calor que la active.

A continuación se muestran las reacciones en cadena de descomposición del polifosfato amónico:



Dichos retardantes, se suelen mezclar con una relación de entre 1/4 y 1/5 (partes de concentrado/partes de agua en volumen), generando una mezcla final caracterizada por una densidad de 1,08 g/cm<sup>3</sup> a 1,10 g/cm<sup>3</sup>, por lo que el volumen que se suele cargar es aproximadamente de un 10% menos en peso del mismo volumen cargado si la disolución fuera de agua <sup>[1]</sup>.

## 3.5 Estado del arte de la extinción de incendios por aire

### 3.5.1 Tipología de operaciones

Como se ha comentado anteriormente, los aviones de extinción de incendios se clasifican por qué capacidad de agua o retardante pueden transportar y descargar.

A la hora de hacer las descargas de agua, hay determinados factores que influyen en la geometría, área cubierta y efectividad de la descarga, como la capacidad de los depósitos tipo

de aeronave, sistema de control de la descarga y la altura a la que se realiza. Ésta última se clasifica en la siguiente tabla:

Tipo de aeronave	Altura mínima descarga [m]	Altura efectiva descarga [m]
Clase II	50	70-65
Clase III	20	30-25

*Tabla 3.5.1:* Clasificación alturas de descarga según clases

Existen otros factores que influyen en el resultado de descarga que se obtiene, como la velocidad de la descarga, topografía del terreno, viento y la densidad de masa forestal de la zona de descarga. Estos factores determinaran si el impacto de la descarga tiene éxito o no. Según estos factores se clasifican las siguientes variantes de descarga para aeronaves de ala fija que son el objetivo de estudio:

- **Descarga larga**

Este tipo de descarga se caracteriza por el tratamiento de la mayor extensión de terreno posible, sincronizando la apertura de los depósitos con tal de rociar la mayor cantidad de retardante durante la mayor cantidad de tiempo. Se suele usar en incendios con frentes de fuego extenso y regular, y se prioriza la longitud tratada frente a la superficie tratada.

- **Descarga corta**

Se caracteriza por la descarga de todo el contenido de todos los depósitos a la vez, priorizando así la densidad de la descarga en la zona tratada. Se usa generalmente en flancos secundarios de mayor extensión o en incendios pequeños, asegurando una gran efectividad de extinción por impacto.

- **Descarga baja**

Se caracterizan por realizarse a baja altitud, justo por encima de la vegetación asegurando una gran penetración sobre la zona a tratar y mayor violencia de impacto, cuya fuerza puede ser de gran peligro si existen efectivos terrestres cerca de la zona de impacto. Es por este motivo, que cuando se realizan este tipo de descarga, la coordinación tierra-aire debe ser perfecta. Las alturas vienen regidas por la *tabla*



3.5.1. También cabe remarcar, que si hay líneas de alta tensión cerca el piloto puede decidir no realizar la descarga debido a la potencial siniestralidad en vuelo raso.

- **Descarga alta**

Es la opuesta a la anterior. Se caracteriza por tratar una gran superficie de terreno, usada sobre todo para refrescar o humedecer zonas cercanas a un frente o una zona ya quemada y sofocada. Este tipo de descarga, se ve afectada sobre todo si existe viento en la zona, provocando una gran dispersión del retardante o agua lanzados.

Según el tipo de estrategia seguida, se combinan los distintos tipos de descargas, dando paso así a los lanzamientos, que son la clasificación de la localización y combinación de descargas en emplazamientos determinados del incendio. Existen tres tipos de lanzamiento:

- **Lanzamientos exteriores**

Estos lanzamientos se realizan fuera del área afectada por el incendio y se caracterizan por ser de carácter humectante, realizándose descargas altas y largas para alcanzar la mayor superficie posible a refrescar.

Se realizan sobre todo para proteger núcleos urbanos e infraestructuras como cable de telefonía o de alta tensión, como se observa en la *figura 3.5.1*.



*Figura 3.5.1.:* Descarga exterior, cerca de núcleo urbano [28]

- **Lanzamientos en cadena**

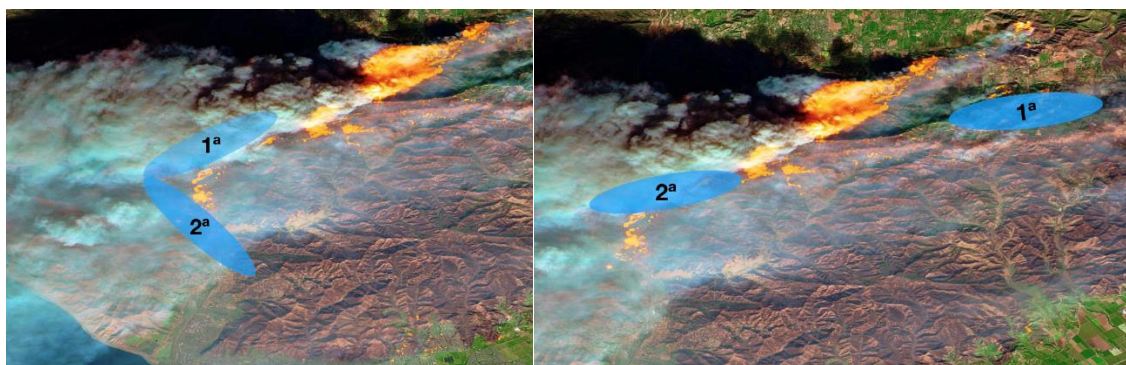
Este tipo de lanzamientos se caracterizan por solapar las descargas una tras otra para crear una línea de superficie tratada. Este tipo de técnica se utiliza para avanzar por los flancos y la cola del incendio ayudando a las unidades terrestres, como se ve en la *figura 3.5.1.2*.



*Figura 3.5.1.2:* Solapamiento de descargas [elaboración propia]

- **Lanzamientos parciales**

Este tipo de estrategia se usa principalmente para sofocar focos secundarios o para evitar el avance del frente del incendio. El avión realiza descargas independientes o en forma de tijera para frenar el avance, vaciando de forma continua los depósitos del avión.



*Figura 3.5.1.3:* Descargas parciales en tijera (izq.) y distribuidas (derecha) [elaboración propia]

También se pueden distinguir los tipos de lanzamiento según el tipo de aproximación que hace la aeronave hacia la zona de descarga:

- **Lanzamientos en plano**

Cuando se realiza una aproximación sobre un terreno, es durante la tipología de lanzamiento que la aeronave sufre menos fatiga estructural y durante la cual los elementos de propulsión sufren menos, ya que se mantiene un nivel de vuelo con

altitud y velocidad constantes. Es el más seguro también por la gran visibilidad de la que dispone el piloto para poder identificar obstáculos en su trazada.

- **Lanzamientos con pendiente**

Dentro de esta categoría se diferencian los de pendiente descendiente y ascendente. También se caracterizan por ser los de mayor peligro, debido a faltas de visibilidad y corrientes de viento fuerte creados por las columnas térmicas que provienen del incendio o de vientos característicos de la zona con pendiente.

Los lanzamientos descendentes se caracterizan por realizarse desde la parte más alta de la montaña hasta la parte más bajo, realizando la descarga de arriba abajo. El instante más crítico de ésta operación es antes de iniciar la descarga, ya que el piloto no tiene visibilidad de la parte situada detrás de la ladera de la montaña.

En cambio, los lanzamientos ascendentes se caracterizan por tener buena visibilidad durante todo el proceso de descarga, iniciándolo en la parte inferior de la ladera hasta la parte superior. En cambio, para el avión es más crítico debido al esfuerzo que debe realizar y a las fuerzas  $G^4$  extras del ascenso repentino que se debe realizar, que causa mayor fatiga estructural.

- **Lanzamientos sobre vertiente**

Es más seguro que el que se realiza en pendiente ya que éste no se realiza a lo largo del pendiente sino que se realiza siguiendo el contorno de una cota.

### ***3.5.2 Operaciones conjuntas de extinción***

Es importante remarcar que los trabajos de extinción deben ser conjuntos entre los efectivos terrestres y los aéreos, ya que los aéreos solos no serían capaces de extinguir los incendios ellos solos. La coordinación de dichos medios es fundamental para el éxito de la misión, y las funciones principales de los medios terrestres o del coordinador táctico asignado son:

- Determinar la posición de los objetivos y decidir qué tipo de descarga requieren y los lanzamientos que se deben usar.
- Comunicar correcciones al piloto observando los resultados de las descargas previas.
- Comunicar peligros a las aeronaves.

---

<sup>4</sup> Dícese de la aceleración relativa a la que está sometido el cuerpo de estudio, a parte de la gravedad

Es por estos motivos, que se han desarrollado planes de actuación conjunta, que combinan la actuación de los dos medios [1]:

- **Ataque directo**

Este tipo de ataque se caracteriza por realizar descargas directas sobre las llamas, para reducir así la fuerza de avance del incendio o la violencia de las llamas para el posterior control por parte de efectivos terrestres. Se suele aplicar si existe buena visibilidad y si no se compromete la integridad de las aeronaves por la altura de las llamas, que ésta debe ser reducida.

Este tipo de estrategia se aplica para extinguir los flancos y en la cabeza del incendio si se cumple la condición anterior de la altura de las llamas, como se muestra en la *figura 3.5.2*.



*Figura 3.5.2:* Esquema de un ataque directo [1]

Para todo tipo de ataque, los helicópteros apoyan más a los efectivos terrestres por su baja velocidad de vuelo y baja capacidad de descarga en comparación con los aviones.

- **Ataque paralelo**

Los ataques en paralelo se dan cuando el avión de extinción realiza las descargas en la zona exterior del perímetro del fuego, entre 30m o 40m de la línea de fuego, para así humedecer la zona previamente a ser consumida por el fuego o al descargar retardante químico se provoca una ralentización en la propagación del fuego evitando que combustione por ese flanco. También se utiliza este tipo de ataque para direccionar el frente del fuego hacia otras unidades terrestres para así extinguirlo.



Mientras se realizan estas descargas para frenar el avance del frente, los efectivos terrestres atacan el fuego por los flancos, con ayuda de descargas certeras de los helicópteros de apoyo, como se puede observar en la *figura 3.5.2.1*.



*Figura 3.5.2.1:* Esquema de un ataque paralelo [1]

- **Ataque indirecto**

Este ataque se basa en tratar el combustible vegetal alejado del frente del fuego, y prepararlos para cuando llegue creando así una zona de contención. Se suele crear con descargas de retardantes de llama, creando como una línea o muro de contención, como se puede ver en la *figura 3.5.2.2*.



*Figura 3.5.2.2:* Esquema de un ataque indirecto [1]

## 3.6 Descripción del sistema MAFFS II

### 3.6.1 Descripción de la aeronave portadora

La aeronave portadora del sistema *MAFFS II* como ya se ha comentado anteriormente, es el *Lockheed Hercules C-130*. Dicho avión, se empezó a construir en Estados Unidos en los años 1950, siendo uno de los aviones más fabricados y más fiables fabricados hasta el momento, de los cuales se fabricaron 2.262 unidades hasta el 2006.

Se define como un avión de transporte militar de media y pesada carga, diseñado con un compartimento de carga libre, una rampa de carga trasera integral y compartimento de carga presurizado. Fue diseñado para los territorios más hostiles, siendo capaz de aterrizar y despegar en pistas no preparadas o asfaltadas y en cortas distancias, para el transporte de tropas y carga militar; Todo gracias a su diseño de ala alta y sus cuatro motores turbohélice. Durante el transcurso de los años se ha podido desarrollar su gran versatilidad y ha dado apoyo en otras funciones como búsqueda y rescate, asalto aéreo, soporte a investigación científica, reconocimiento meteorológico, patrulla marítima reabastecimiento en vuelo y la más relevante para este proyecto, la lucha contra incendios.



*Figura 3.6.2:* Imagen de un C-130H [28]

La primera unidad de esta aeronave fue adquirida por España en 1973, bajo la denominación interna de T-10. En la actualidad, el Ejército del Aire dispone de 6 unidades de C-130 y 5 unidades de la versión KC-130 adaptada para reabastecer otras aeronaves militares en vuelo.

En sus cuarenta años de servicio activo, el Hercules ha prestado todo tipo de servicios al Ejército del Aire, transportando tropas, armamento y equipamiento militar durante todos los conflictos armados en los que se han visto enroladas las Fuerzas Armadas. No solo ha prestado sus servicios en conflictos armados, sino que también ha prestado ayuda humanitaria en

situaciones de catástrofes naturales, transportando equipamiento médico, provisiones y otro tipo de suministros necesarios, aportando incluso evacuación médica cuando se requiera.

### **3.6.2 Introducción del sistema MAFFS II**

El **Modular Airborne FireFighting System II** o Sistema **MAFFS II**, es el resultado del desarrollo conjunto entre el *United States Forest System*, *United Aeronautical* y *Blue Aerospace*, para poder crear un sistema contra incendios versátil, de gran eficacia y que aprovecharse los recursos o aeronaves de los que disponía la Guardia Nacional Americana para la extinción de incendios forestales. La principal motivación por la cual la Guardia Nacional estadounidense desarrolló este sistema era que existía un aumento de siniestralidad de fuegos, a su vez se recortó el presupuesto para la lucha contra incendios y existía un deterioro en sus aeronaves, con el consiguiente cese de actividad de las aeronaves más deterioradas.



Figura 3.6.1: Imagen de un C-130 con el sistema MAFFS II [28]

Dicho sistema fue usado en su primer incendio forestal en Julio de 2008 por el escuadrón de carga *302d Airlift Wing* del Ejército del Aire de los EEUU. El **MAFFS II** es la versión mejorada de su antecesor, el **MAFFS**, que fue desarrollado en el 1970 y con la primera instalación de dicho sistema en Julio de 1971. Este sistema tenía menor capacidad y también padecía de ciertas carencias que lo hacían un sistema poco eficiente a nivel táctico y logístico. La mayor desventaja que padecía dicho sistema era la carencia de presurización a bordo de la aeronave, que evitaban que el C-130 pudiera aterrizar en cualquier base remota para reabastecerse de

retardante de llama, ya que debía aterrizar en la misma base de dónde despegaba para reabastecerse de retardante presurizado.

En la clasificación de aeronaves contra incendios mencionada en el *punto 3.4.1*, el C-130 equipado con el sistema MAFFS II, entraría en la categoría de clase I, un tipo de aeronave de la cual España no dispone actualmente ni ha dispuesto anteriormente.

<b>Lockheed C-130 Hercules (MAFFS II)</b>	
Velocidad de crucero	550 km/h
Capacidad de carga	11.350 l
Régimen de ascenso	9,3 m/s
Autonomía    Alcance	7,2 h    3.940 km

Tabla 3.6.2: Resumen de características de un C-130 con el sistema MAFFS II

### 3.6.3 Partes del sistema

El sistema *MAFFS II* está paletizado para facilitar su carga en el avión y se subdivide en tres partes funcionales, como se aprecia en la *figura 3.6.3*:

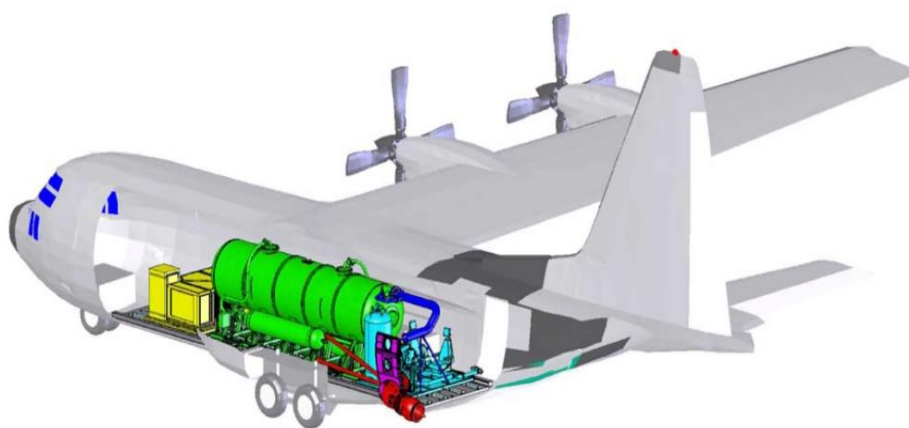


Figura 3.6.3: Esquema de la distribución del sistema MAFFS II en un C-130 [29]



- **Unidad de suministro (amarillo):** En esta unidad es donde se encuentran los transformadores, paneles eléctricos y otros componentes eléctricos que alimentan todos los componentes eléctricos del sistema como los compresores y todos los elementos de control.
- **Unidad de almacenaje (verde):** Se compone del depósito principal de almacenaje, un tanque de almacenamiento con capacidad para 12.870 litros de retardante pero que se limitan a 11.350 litros para evitar una excesiva fatiga estructural del avión. En esta unidad, también se encuentran dos depósitos auxiliares donde se almacena el aire comprimido por los compresores.
- **Unidad de control (azul):** Se encuentra en la parte posterior del sistema, y es donde se encuentran todos los paneles de control de descarga y control de flujo. Estos paneles son controlados por los operadores de descarga, que son los encargados junto con el piloto de iniciar y finalizar la descarga, seleccionando la cantidad de retardante que se quiere descargar.

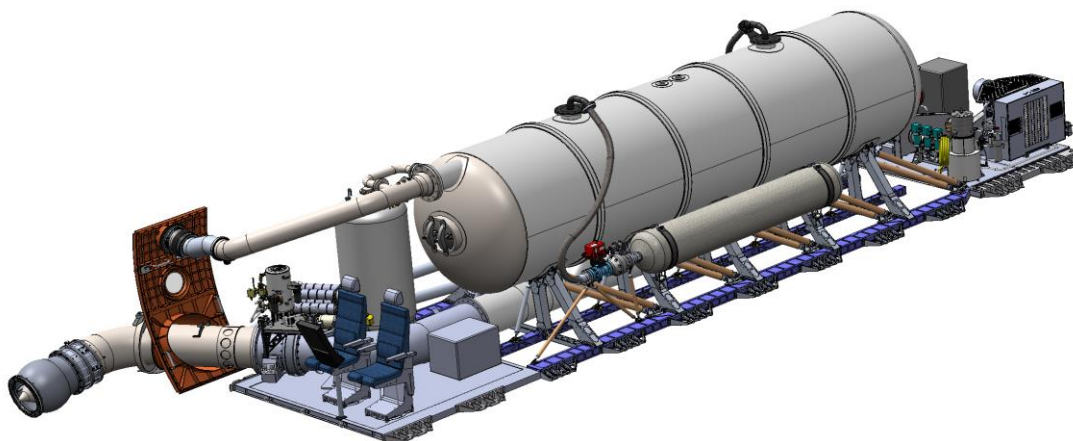
Las partes mencionadas anteriormente son las partes que permanecen dentro de la bodega de carga del avión, pero para poder descargar el retardante de llama se requiere cambiar la puerta de acceso lateral por una especial que permite el paso de una tubería a través de ella que conecta el depósito principal con el difusor:

- **Difusor (rojo):** Es la parte del sistema *MAFFS II* que permanece en el exterior del avión, y sirve para distribuir el retardante de llama, en la *figura 3.6.3.1* se puede observar una foto en detalle del difusor exterior.



*Figura 3.6.3.1:* Detalle del difusor exterior del sistema [28]

Para poder visualizar como estaría montado el sistema *MAFFS II* en la bodega de carga del avión, se puede observar en la *figura 3.6.3.2* la representación 3D del sistema ensamblado.



*Figura 3.6.3.2:* Representación 3D del sistema *MAFFS II* [29]

#### 3.6.4 Funcionamiento

El sistema *MAFFS II*, actualmente está implementado en el protocolo para la lucha contra incendios de EEUU, Brasil, Marruecos, Grecia, Túnez, Turquía, Tailandia y Colombia. Una vez se activa el protocolo y se requiere de un avión cargado con un sistema *MAFFS II*, el tiempo de respuesta en EEUU es de máximo 24 horas desde que se solicita hasta que se realiza la primera descarga, siguiendo las siguientes fases:

- **Asignación del avión**

Una vez solicitado el apoyo, se requiere de una unidad de C-130, que debe abandonar sus obligaciones como avión de transporte militar para la carga del sistema. Si no se dispone de ningún avión en la misma base, se fleta desde otra base para que cargue el sistema.

- **Proceso de carga del sistema**

El proceso de carga del sistema en un C-130 puede llegar a durar hasta una hora, para cargar el pallet central, substituir la puerta lateral de acceso por la habilitada y conectar el difusor exterior con la tubería principal de descarga.



*Figura 3.6.3.3:* Proceso de carga del sistema MAFFS II [28]

- **Cargado de retardante de llama**

Una vez el sistema está cargado en la bodega del avión, se carga el depósito principal con retardante de llama. Esta operación se refuerza con el apoyo logístico de depósitos en tierra donde se realiza la mezcla de retardante al 20% en volumen previo al llenado del tanque como se ve en la *figura 3.6.3.4*. Una vez mezclado, se bombea la solución al avión con bombas de tipo centrífugo de baja presión y alto caudal de aproximadamente 1.500 l/min.



*Figura 3.6.3.4:* Proceso de llenado del sistema MAFFS II [28]

- **Vuelo hasta el siniestro y descarga**

Una vez cargado y llenado el sistema MAFFS II, se procede a volar hacia el lugar del siniestro y se buscan aeródromos cercanos a la zona del siniestro donde el C-130 pueda aterrizar y rellenar el sistema de retardante de llama, para enviar ayuda logística a ese aeródromo previo a la llegada del C-130 para instalar los depósitos de llenado auxiliares en tierra y las bombas hidráulicas.

En el proceso de descarga, el sistema es capaz de realizar varias descargas o una sola, vaciando todo el depósito menos de siete segundos.

Cabe remarcar que ocho sistemas *MAFFS II* cubren una superficie de 9,834 millones de km<sup>2</sup>, cuando la superficie de toda Europa es de 10,18 millones de km<sup>2</sup> y que de ese tiempo de respuesta también se contabilizan las horas de vuelo hasta el siniestro.

## **4. Análisis técnico del sistema MAFFS II**

### **4.1 Potencial de extinción**

Para determinar la viabilidad del sistema *MAFFS II*, se deberá determinar su potencial de extinción y la posibilidad de integración en un plan conjunto de actuación en caso de incendio y en qué tipo de incendio deberá ser desplegado. El potencial de extinción viene determinado por la capacidad del sistema solución por gestionar los conceptos de caducidad de descarga, cadencia de descargas, tiempo en seco sobre la vertical del incendio y de la posible formación de circuitos de noria o <<carruseles>>. Dicho potencial de extinción también vendrá determinado por las características técnicas de su nave portadora, el *C-130H*.

#### **4.1.1 Formación de circuitos de noria**

La formación de circuitos de noria o los llamados <<carruseles>>, es uno de los procedimientos organizativos de los medios aéreos y sus descargas en un incendio forestal. Este sistema, agrupa la carga y reabastecimiento de los medios aéreos en un mismo punto, para de este modo tener un

sistema continuo de descargas sobre los focos del incendio. Con este sistema de gestión, se permite hacer un uso más eficiente de los medios aéreos para así permitir un avance más rápido y conciso por parte de los efectivos terrestres.

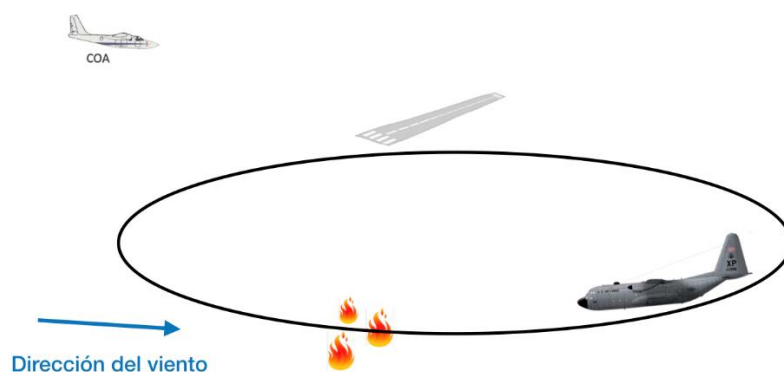
Dichos <<carruseles >>, para que sean eficientes, deben ser del mismo tipo de aeronave, ya que si se combinan distintos tipos de aeronave en un mismo circuito de noria rompe la dinámica de descargas provocando retrasos que provocan una ineficiente extinción del incendio.

De todos modos, sí que es viable el uso de distintos circuitos de noria en un mismo incendio. Se pueden combinar <<carruseles>> de medios de ala rotativa y ala fija distinguiendo cada uno su punto de carga por separado.

A su vez, como se ha comentado con anterioridad, según las características del medio aéreo se deberá posicionar en los distintos puntos estratégicos del incendio, en función de la necesidad de descarga (en función del viento, topografía u otras características de la zona).

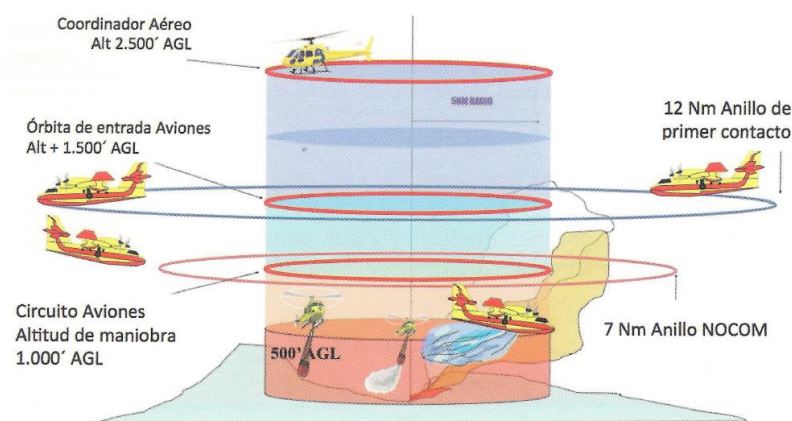
Para el caso del *Hércules*, portador del sistema *MAFFS II*, como para empezar a realizar el estudio técnico de viabilidad del mismo, se empezará con una sola unidad del sistema con el consecuente circuito de noria único para dicho aeroplano, debido a sus características especiales.

Para el caso del sistema *MAFFS II*, el circuito de vuelo más adecuado sería de forma oval, ya que permitiría realizar la descarga en contra de la dirección del viento, para facilitar el ascenso del avión, ya que el viento en contra incrementa la velocidad aparente del avión y le permite volar a menor velocidad respecto a tierra. Dicho factor será una ventaja en aquellos casos donde el sistema *MAFFS II* no se descargue de una sola vez. En caso de múltiples descargas, el circuito de descarga cambia y el ovalo se centraría sobre el incendio reduciendo su radio. Una vez descargado todo el contenido del *MAFFS II*, se retornaría a la base más cercana a reabastecerse de retardante, y se realizaría otra vez el circuito oval grande.



**Figura 4.1.1:** Esquema del circuito a realizar por el C-130H [elaboración propia]

En el caso de las múltiples descargas del sistema *MAFFS II*, el circuito oval grande se reduce a un anillo de seguridad llamado AVI, o área de la vertical del incendio, dónde el C-130 permanecería realizando un circuito circular sobre la vertical del incendio, a una distancia de entre 9,3 km y 13 km del centro del AVI. El coordinador de operaciones aéreas o COA, es el encargado de coordinar todas las operaciones aéreas de la AVI y de todas las aeronaves. Dicha esquematización se puede observar en la *figura 4.1.2* mostrada a continuación:



**Figura 4.1.2:** Esquema del Área Vertical del incendio o AVI [1]

Una vez autorizada la descarga por el COA, el C-130H procedería a realizar la entrada en el AVI desde una altitud de 460 metros sobre el nivel del terreno, (AGL o “*above ground level*”, de sus siglas en inglés).

#### **4.1.2 Caducidad y cadencia de las descargas**

En el caso de las descargas realizadas en un incendio, se debe tener en cuenta que estas tienen caducidad, es decir, un tiempo por encima del cual si no ha habido consolidación por parte de efectivos terrestres o una consecución de otras descargas aparecerán reproducciones o focos secundarios. En estos casos, la aplicación de retardantes a largo plazo o descargas con alta cadencia entre sí, alargarán la longevidad del efecto de las mismas sobre la zona de impacto.

La cadencia de las descargas vendrá determinada por el tiempo transcurrido entre descarga y descarga, la distancia a la base dónde reabastecerse de retardante, el tiempo de reabastecimiento, intensidad del tráfico aéreo en la base de reabastecimiento y el propio tiempo de vuelo. Los regímenes de descargas aéreas estándar se recogen a continuación:

- ***Ideal***: Entre 5 y 7 minutos.
- ***Acceptable***: Inferior a 15 minutos.
- ***Discontinuo***: Mayor a 15 minutos.

En el caso del sistema *MAFFS II*, la cadencia de las descargas estará entre un rango de tiempos aceptable o discontinuo, dependiendo del volumen seleccionado a descargar, sea en una única descarga o múltiples.

##### **4.1.2.1 Cadencia de las descargas del sistema *MAFFS II***

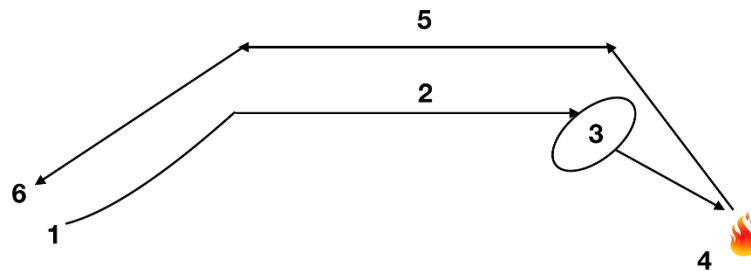
Para poder analizar la cadencia de descargas del sistema *MAFFS II*, se distinguirá el caso de descarga única y el de descargas múltiples:

- ***Descarga por mitades***

Para poder establecer el tiempo efectivo por descarga completa del sistema *MAFFS II*, se deberá establecer que ciclo de procedimientos son necesarios para que el sistema esté preparado y listo para descargar su contenido en dos descargas.



Se seguirán las siguientes fases de vuelo:



*Figura 4.1.2.1.a:* Esquema de las fases de vuelo de descarga única [elaoración propia]

1. **Fase inicial:** En esta fase del vuelo se incluye las fases de encendido de motores, rodaje hasta la pista de despegue, despegue y ascenso a nivel de vuelo establecido por el plan de vuelo. Se parte de la base que el sistema está cargado en la base de carga del C-130.
2. **Crucero de ida:** Se considera el tiempo de vuelo desde que se intercepta el nivel de vuelo del plan de vuelo hasta la llegada a la destinación.
3. **Vuelo en círculo o "loiter":** Fase del vuelo en que el avión entra en el anillo de los 13 km y vuela en círculos en el AVI, hasta que el COA autoriza su descarga.
4. **Descarga:** Fase del vuelo desde que el C-130 es autorizado a descargar hasta que ya la ha realizado. Como procedimiento estándar del sistema *MAFFS II*, se establece que el piloto debe realizar una pasada previa a la descarga por encima para asegurar la zona de descarga. Se volverá a la fase3 en un periodo corto de tiempo para realizar la segunda descarga por mitades.
5. **Crucero de vuelta:** Fase del vuelo desde que se descarga hasta que se asciende hasta interceptar la altitud de vuelo de retorno a la base.
6. **Fase final:** Incluye la fase de descenso de altitud, aproximación final a la base, aterrizaje y rodaje hasta rampa dónde se paran motores y se inicia la fase de reabastecimiento de retardante con una duración de hasta 15 minutos.



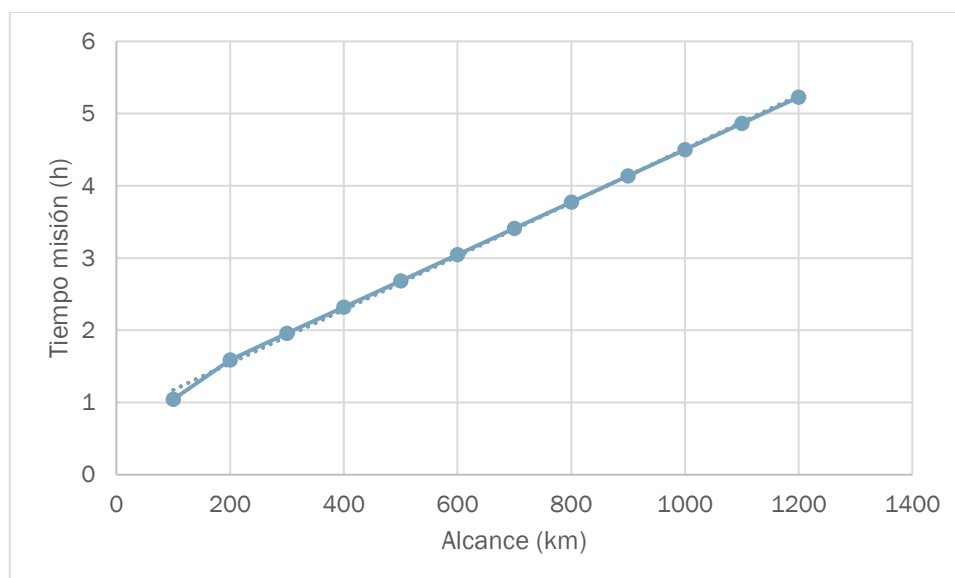


Gráfico 4.1.2.1: Tiempos estimados por misión de descarga única [elaboración propia]

En el caso de descargas por mitades, considerando un radio de acción de máximo 1200 km (siendo ésta la distancia del trayecto de ida), como se comentará en el apartado 4.1.3 por razones de carga y combustible, se ha obtenido el *gráfico 4.1.2.1* de tiempo total por misión (de todas las fases, desde puesta en marcha hasta apagado de motores) en función de la distancia de la base al incendio. Como se puede observar, las misiones se lanzarán desde la base de partida al incendio y luego se establecerá una base de reabastecimiento próxima al incendio por debajo de los 100 km del incendio, optimizando así su cadencia de descargas. Retornar a reabastecerse a una base con mayores distancias, daría lugar a una cadencia de descargas discontinua y no óptima.

Como se puede observar en el *gráfico 4.1.2.1.a* mostrado a continuación, la cadencia de descarga por mitades, cuanto más cerca se está de la base esta aumenta, mejorando su eficiencia. En todos los casos de alcance, la cadencia media de descargas de 6.385 litros de retardante es de 2,35 descargas a la hora.

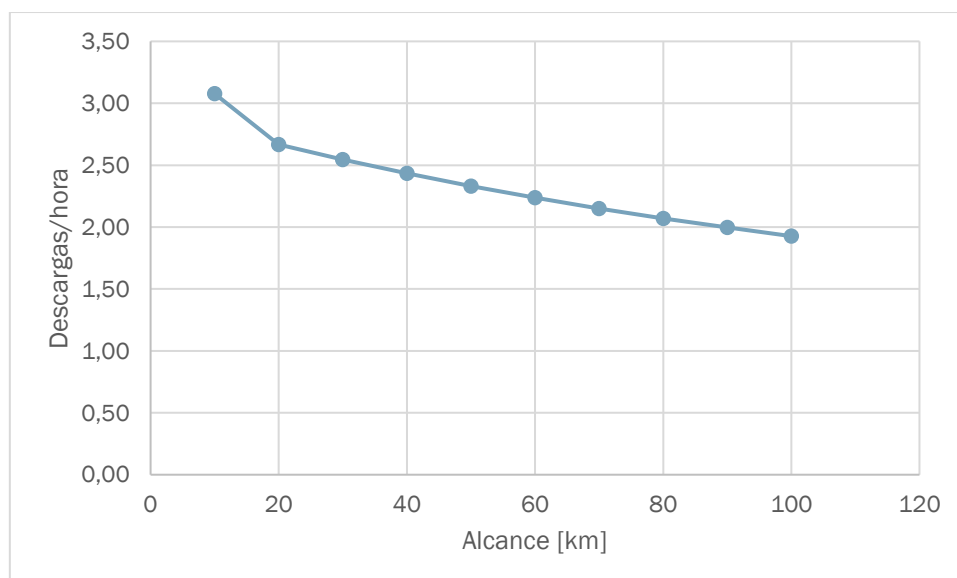


Gráfico 4.1.2.1.a: Cadencia de descargas por mitades de tanque [elaboración propia]

- **Descargas múltiples**

En el caso de realizarse descargas múltiples, se seguirán los mismos procedimientos de vuelo, pero se añadirá una fase extra. Una vez realizada la primera descarga, al no haber descargado todo su contenido, el C-130 se incorporará al anillo de 9 km de radio sobre el AVI, esperando autorización del COA. Hasta que agote su carga, realizará las fases 3, 4, 5 en bucle.

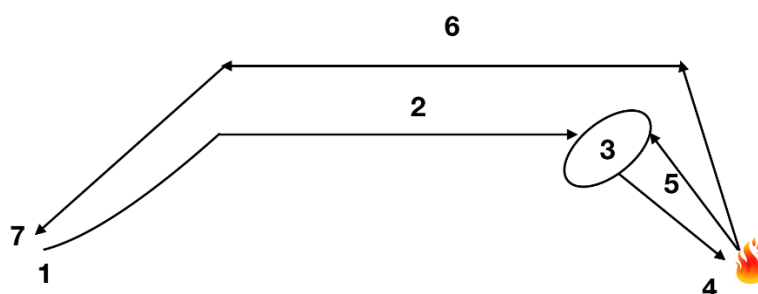


Figura 4.1.2.1.b: Esquema de las fases de vuelo de descargas múltiples [elaboración propia]

En el caso de las descargas múltiples, el C-130 seguiría el mismo gráfico 4.1.2.1 de cadencia de descargas si se excluyen las  $n-1$  descargas consecutivas del ciclo de fases en bucle 3, 4 y 5; siendo  $n$  el número total de descargas. En este caso también se aplicará la búsqueda de bases cercanas a radios menores de 100 km del AVI, para aumentar la cadencia de descargas.

Para las descargas múltiples, el sistema *MAFFS II* tiene 8 tipos distintos de descarga, dando la posibilidad de subdividir el volumen total en volúmenes más reducidos o modificando el caudal de salida, según la necesidad de los efectivos terrestres o a voluntad del COA. En todos los casos de descarga múltiple, el sistema *MAFFS II* puede atenerse a un rango ideal de cadencia de descargas de entre 5 minutos y 7 minutos entre lanzamientos.

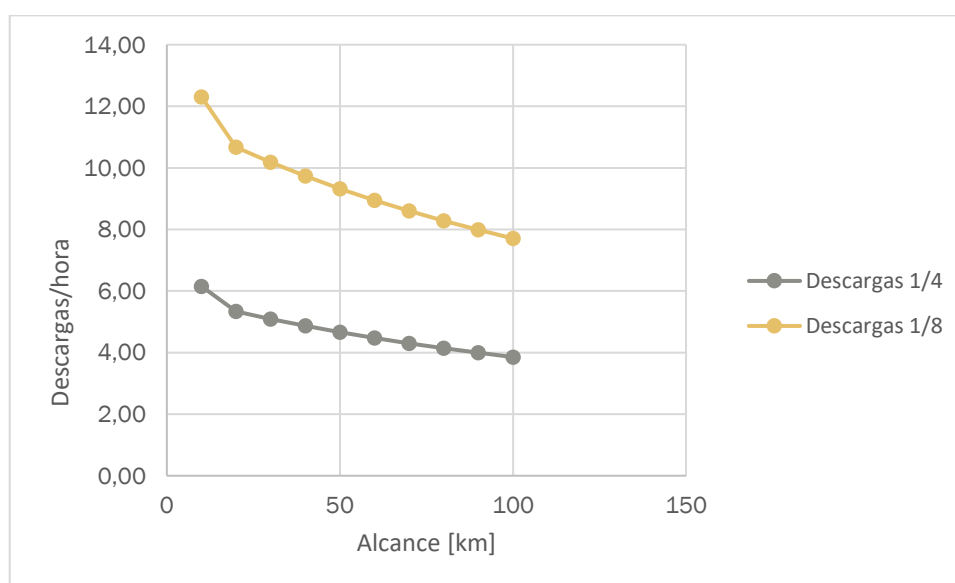


Gráfico 4.1.2.1.b: Cadencia de descargas por cuartos y octavos de tanque [elaboración propia]

Como resultado medio, de descargas por cuartos de tanque de 3.365 litros se obtiene una cadencia de 4,69 descargas por hora, mientras que en el caso de octavos de tanque se obtiene una cadencia media de 9,37 descargas de 1.415 litros de retardante por hora.

### **4.1.3 Tiempos en seco sobre la vertical del incendio**

El estudio del llamado tiempo en seco sobre la vertical del incendio, se refiere al tiempo que se deja sin apoyo aéreo a los efectivos terrestres debido a que las unidades aéreas deban repostar o reabastecerse a la vez, permitiendo que la violencia del incendio aumente sin poder tener ningún tipo de descarga aérea. Es por este motivo que al declararse un incendio se despachan los medios aéreos

de forma escalonada, para evitar que deban repostar todas a la vez. Para evitar esta situación, el mando de emergencias desarrolla el llamado cronograma, dónde se establecen los tiempos de extinción, descanso y repostaje de todas las aeronaves despachadas en un incendio en un lapso de tiempo de 24 horas.

El término “seco” se refiere principalmente a la carencia de combustible suficiente para seguir desarrollando las labores de extinción y poder aterrizar con seguridad en la base de la cual se ha despachado el medio aéreo.

#### **4.1.3.1 Límites operativos del C-130 con el sistema MAFFS II**

Para contemplar los límites operativos del C-130 equipado con el sistema *MAFFS II* a bordo, se deberán realizar unas suposiciones de partida para poder estimar dichos límites.

- **Límite de peso**

Para poder determinar el alcance en km del avión o el número de horas que podrá estar el avión en el aire, primero se debe determinar la carga del mismo. El C-130 tiene un límite de peso en despegue de 70.307 kg.

$$W_{\max \text{despegue}} = W_O + W_{\text{fuel}} + W_{\text{carga}} ;$$

Dónde:

$W_O \rightarrow$  Peso del avión vacío [kg]

$W_{\text{fuel}} \rightarrow$  Carga de combustible [kg]

$W_{\text{carga}} \rightarrow$  Peso de la carga a transportar [kg]

El peso del C-130 vacío o  $W_O$ , contabilizando el peso de cinco tripulantes, lubricantes, refrigerantes y otros es de 39.009 kg. En el caso del sistema *MAFFS II*, el  $W_{\text{carga}}$  será la suma del peso del propio sistema más el volumen de retardante, teniendo en cuenta su densidad. El peso en vacío del sistema es de 4.763 kg.

$$W_{\text{retardante}} = V_{\text{retardante}} \cdot \rho_{\text{retardante}} = 11.350[l] \cdot 1,1 \left[ \frac{kg}{l} \right] = 12.485 \text{ kg}$$

$$W_{\text{carga}} = W_{\text{MAFFS II}} + W_{\text{retardante}} = 4.763 + 12.485 = 17.248 \text{ kg}$$

$$W_{\max \text{despegue}} = 70.307 = W_{\text{fuel}} + 17.248 + 39.009$$

De esta forma, podemos obtener la carga máxima de combustible ( $W_{fuel\ max.}$ ) con la que podrá despegar el C-130 en caso límite, que serán 14.050 kg.

Este  $W_{max\ despegue}$  para evitar fatiga estructural en el avión, aunque en situaciones excepcionales se puede llegar a los 79.379 kg de peso. El peso será el que determinará tres factores clave como la longitud de pista necesaria para despegar, la velocidad de rotación y el régimen de ascenso mínimo.

Se establece como premisa, que el C-130 despegará cargado siempre con la máxima carga de retardante dentro del sistema *MAFFS II*, de 17.248 kg.

- ***Velocidad de rotación***

La velocidad de rotación, dependerá como se ha comentado con anterioridad del peso en despegue del avión. Con el peso máximo anterior, la velocidad de rotación del C-130 será de 328 km/h, basado en el resultado del programa utilizado por los pilotos del Ejército del Aire.

- ***Longitud de pista***

La longitud de pista mínima para despegar con seguridad, con los mismos parámetros utilizados con anterioridad será de 2.350 metros, que restringirá los aeropuertos que pueda visitar el avión, aunque se podrá establecer un peso de combustible adecuado para cada pista para poder despegar con seguridad.

- ***Régimen de ascenso mínimo***

El régimen de ascenso mínimo establecido, se define como el régimen de ascenso que pueda llegar a alcanzar el avión en caso de pérdida de un motor para superar un obstáculo del terreno. En el caso del C-130 se trata de un régimen de 47 m/min.

- ***Altitud mínima de vuelo***

Dependiendo de la distancia de vuelo desde la base hasta el incendio, el nivel de vuelo (de las siglas en inglés de "Flight Level") dependerá. En los casos en que la distancia sea de menos de 200 km se volará en FL100, o nivel de vuelo a 10.000 pies o 3.050 metros teniendo siempre en cuenta la topografía del plan de vuelo o ruta a seguir.

En casos de distancias superiores, dependiendo de la meteorología, se optara por FL150 o FL200, entre 15.000 pies y 20.000 pies; entre 4.572 metros y 6.096 metros.

- ***Alcance***

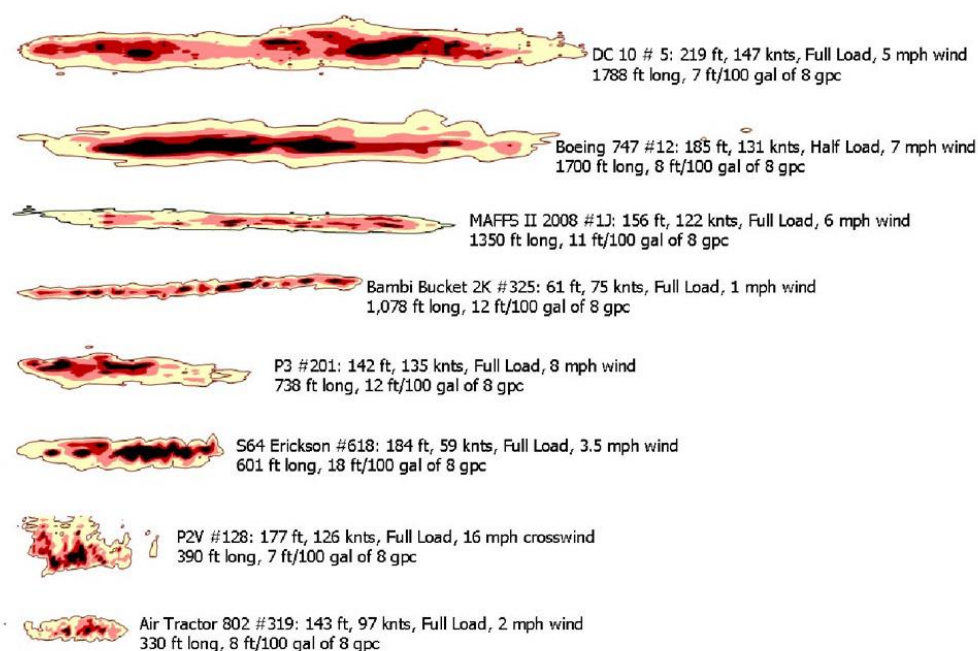
Con la carga de combustible anteriormente comentada de 14.050 kg, se podrá alcanzar sin ningún problema cualquier punto de la península, ya que el consumo de combustible del C-130 en condiciones de vuelo normales de crucero es de 2.267 kg/h y en condición de extinguir fuegos con el sistema *MAFFS II*, el consumo de combustible asciende a 2.722 kg/h. En el peor de los casos, con la carga máxima de fuel establecida el C-130 puede estar en el aire 5 horas, con un alcance máximo de 2.410 km.

Una vez establecidos los límites operativos del avión cargado con el sistema, se puede determinar que el C-130 no tendrá ningún problema de falta de combustible para permanecer en la vertical del incendio, por dos motivos principalmente:

- Al ser un avión de carga de retardante en tierra, a la vez que se deba reabastecer de retardante lo puede hacer a la vez de combustible, llenando parcialmente sus depósitos dentro de los límites operativos de carga.
- Al ser un avión de grandes dimensiones, tiene un gran depósito de combustible que puede llegar a contener 23.587 kg de queroseno, que le permite tener un gran alcance sin repostar.

## **4.2 Análisis de las descargas**

Para evaluar la efectividad de una descarga o para simplemente estudiar el comportamiento de la misma una vez efectuada, se realizan estudios de las mismas, recogiendo datos sobre la longitud de la descarga, anchura, área cubierta, caudal de salida del avión, velocidad del viento y del avión entre otros. En la *figura 4.2*, se puede observar una comparativa de descargas únicas efectuadas por distintos medios aéreos, con las partes más oscuras como las partes más afectadas por el impacto de la descarga a nivel de cobertura.



**Figura 4.2:** Comparativa de descargas únicas realizadas por distintos medios aéreos [28]

### 4.2.1 Introducción teórica

Se ha observado en un conjunto de ensayos, que la anchura y la longitud de la descarga, se pueden manipular modificando los parámetros y modos de descarga de cada avión. También se ha concluido que aunque las condiciones de estudio entre descargas de distintos tipos de aviones se pueden describir mediante relaciones simples, dejando de lado sus diferencias.

Del mismo modo, se ha llegado a la conclusión de que la distribución del retardante sobre la superficie del impacto sigue una distribución Gaussiana, que provoca una fácil predicción de que la mayor cobertura<sup>5</sup> de retardante por unidad de superficie sucederá en el eje central longitudinal de la descarga. [18]

<sup>5</sup> La cobertura se mide con GPC (*Gallons per 100 square feet*), que equivale aproximadamente a 0,407 l/m<sup>2</sup>.

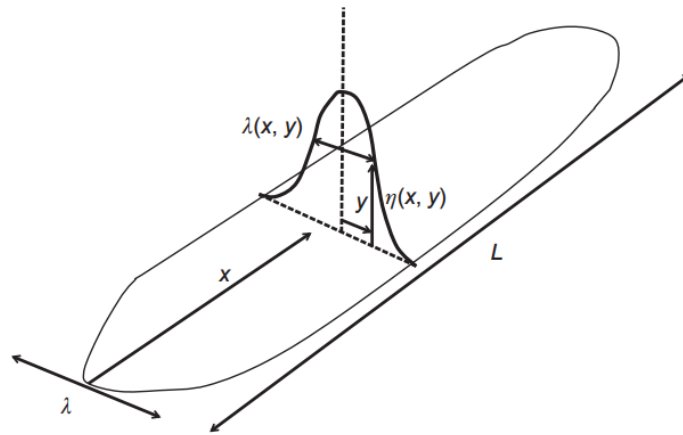


Figura 4.2.1: Distribución Gaussiana de una descarga aérea [18]

Dónde:

$$L \approx U_g T + f_1 \lambda$$

$L \rightarrow$  Longitud de la descarga [m]

$U_g T \rightarrow$  Distancia recorrida por el avión durante la descarga [m]

$f_1 \rightarrow$  Factor corrector dispersión longitudinal

$\lambda \rightarrow$  Anchura de la descarga [m]

Suele darse una dispersión longitudinal en las descargas de retardante, que provoca que se deba usar un factor corrector  $f_1$ , que para vientos moderados se puede aproximar a 2. Dicho factor, es el que relaciona la dispersión transversal con la longitudinal, ya que están correlacionadas. Los vientos se cuantifican según la escala de vientos de *Beaufort* y deberán ser menores 7,6 m/s para poder aproximar el factor corrector a 2.

Para cuantificar el factor de cobertura, se usa la siguiente ecuación:

$$\eta(y) = \eta_{max} \cdot \exp[-y^2/2\lambda_0^2]$$

$\eta(y) \rightarrow$  Cobertura en función de la posición transversal [GPC]

$\lambda_0 \rightarrow$  Desviación estándar del valor de  $\lambda$  (obtenido por  $\eta=0,5$  GPC) [m]

Finalmente, para poder determinar el volumen de retardante mediante cálculos, se puede obtener según la siguiente expresión:

$$V_g = \int \eta(x, y) dx dy = (L - 2\lambda) \int \eta(y) dy$$



Que se podrá aproximar según la siguiente ecuación:

$$V_g \approx \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{\ln(2)}} \cdot (L - 2\lambda) \lambda \eta_{max}$$

#### 4.2.2 Análisis de las descargas del MAFFS II

En el caso del sistema *MAFFS II*, como se ha comentado con anterioridad, existen distintos tipos de configuración de descarga y como consecuencia los patrones de descarga y rasgos característicos de cada una varían.

A continuación se distinguirá entre los distintos tipos de modo de descarga que va en función de la fracción de depósito que se quiera descargar; desde el contenido íntegro, en dos mitades o en cuatro cuartos de depósito.

- **Descarga íntegra**

La descarga única o íntegra del contenido del sistema *MAFFS II*, se considerará innecesaria debido a que deja el *C-130* sin carga de una sola descarga. Únicamente se usará en topografías llanas, con grandes extensiones a cubrir por retardante. Por lo contrario, convertirá al sistema *MAFFS II* en un sistema insuficiente, ya que en el caso de las descargas aéreas no solo es la cantidad de retardante que se lanza, sino cómo este alcanza el incendio y de qué forma lo hace.

En casos excepcionales se llegará a usar la carga íntegra de 11.350 litros de retardante, para crear un cortafuegos extenso para poder dirigir un fuego que se extienda velozmente en llanuras extensas y de vegetación de baja altitud como pastos, rastrojos y matorrales de hasta 0,60 metros de altitud.

Tipo de combustible	Recomendación
Pastos, rastrojos	0,5 litros/m <sup>2</sup>
Matorral de hasta 0,6 m	0,75 litros/m <sup>2</sup>
Matorral de hasta 1,5 m o repoblación joven	1 litros/m <sup>2</sup>
Coníferas jóvenes y matorral entre 1,5 y 2,5m	1,25 litros/m <sup>2</sup>
Bosque de coníferas y frondosas	1,5 litros/m <sup>2</sup>

*Tabla 4.2.2:* Cobertura a aplicar según el tipo de combustible [1]

A nivel orientativo, los valores de la *tabla 4.2.2*, son los niveles recomendados de cobertura de retardante por el tipo de vegetación y para que la aplicación del mismo sea eficiente y pueda frenar el avance del frente o retrasarlo lo suficiente para que los efectivos terrestres lo puedan combatir.

- **Descarga por mitades**

El caso de descargas por mitades, se basará en descargar la mitad del contenido del sistema *MAFFS II* en volumen. El ensayo de dicha descarga se llevó a cabo por el Servicio Forestal de los Estados Unidos, con los siguientes parámetros característicos:

<b>Altitud de lanzamiento</b>	60,35 m	<b>Volumen lanzado</b>	6.385,99 l
<b>Velocidad del avión (<math>U_g</math>)</b>	235,20 km/h	<b>Caudal lanzamiento</b>	639,73 l/s

*Tabla 4.2.2.a:* Parámetros del ensayo de descarga [21]

Con dichos parámetros, se obtuvieron los siguientes valores de cobertura sobre la zona del impacto de descarga:

<b>Nivel de cobertura [GPC]</b>	<b>Área de cobertura [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Longitud de línea [m]</b>
1	7.217,45	495,3
2	4.459,34	476,04
3	1.265,80	396,24
4	209,03	87,78
6	17,46	7,62
8	0	0
10	0	0

*Tabla 4.2.2.b:* Resultados de cobertura del ensayo de descarga [21]

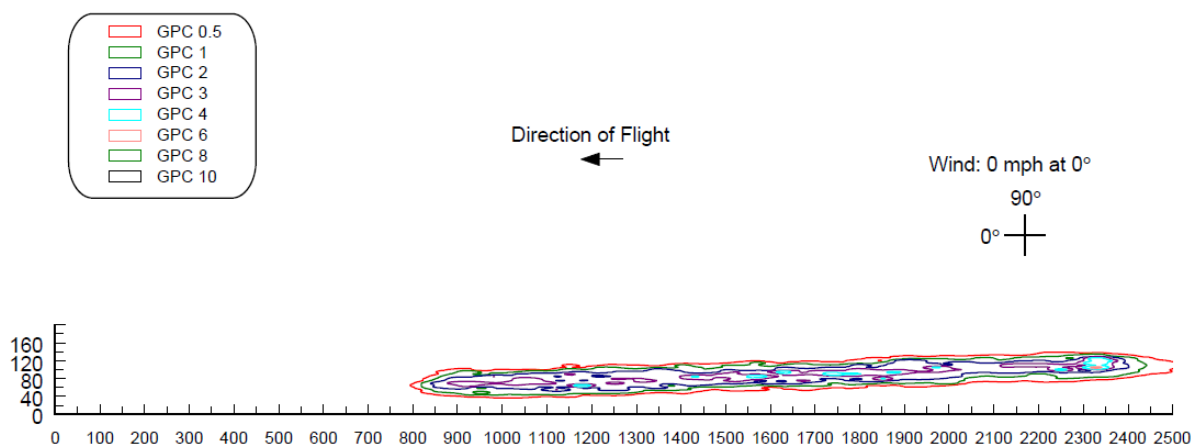


Gráfico 4.2.2.a: Distribución de descarga por niveles de cobertura, valores de los ejes en pies [21]

Con los resultados obtenidos, como se puede observar en la *tabla 4.2.2.b* y comparando con la esquematización del gráfico anterior, el anillo de mayor cobertura es el de  $GPC=0,5$ . El valor efectivo mayor de cobertura es el de nivel 1, de  $GPC=1$  que equivale a  $0,407\text{ l/m}^2$  como se ha comentado anteriormente. Este hecho, supone que existe un anillo de cobertura en el caso del *gráfico 4.2.2.a* de color verde, con un área de  $7.217,45\text{ m}^2$  que recibe  $0.407\text{ l}$  de retardante por unidad de superficie. Dicho anillo de superficie recibe en total  $2.937\text{ l}$  de retardante. Conforme se reduce el valor de  $\lambda$ , es decir, cuanto más cerca se analiza la cobertura respecto del eje longitudinal de la descarga, el nivel de cobertura aumenta llegando hasta un máximo de cobertura axial de 6 GPC, o de  $2,45\text{ l/m}^2$ .

Se puede establecer entonces, que este tipo de descarga destaca por su gran área cubierta con un GPC aceptable para la mayoría de las situaciones y por la gran longitud de la misma, llegando a cubrir una longitud de 496 metros con  $GPC=1$  y 476,4 m con  $GPC=2$ .

Como observación, se puede destacar que de los 6.385 litros lanzados, solo se recuperaron 6.026,37 litros, debiéndose en parte a factores humanos y a la dispersión transversal y vaporización del contenido de la descarga.

También es interesante destacar las siguientes reacciones a nivel de manejo de la aeronave, como se observa en la *figura 4.2.2.a*, cuando el avión realiza la descarga éste experimenta un ascenso repentino manteniendo el impulso de la planta motora constante hasta que el piloto invierte dicha situación. Éste suceso, es consecuencia de la pérdida de carga del avión en forma de descarga de retardante, que provoca un aumento de la fuerza sustentación que era la encargada de contrarrestar la fuerza peso de la carga pérdida.

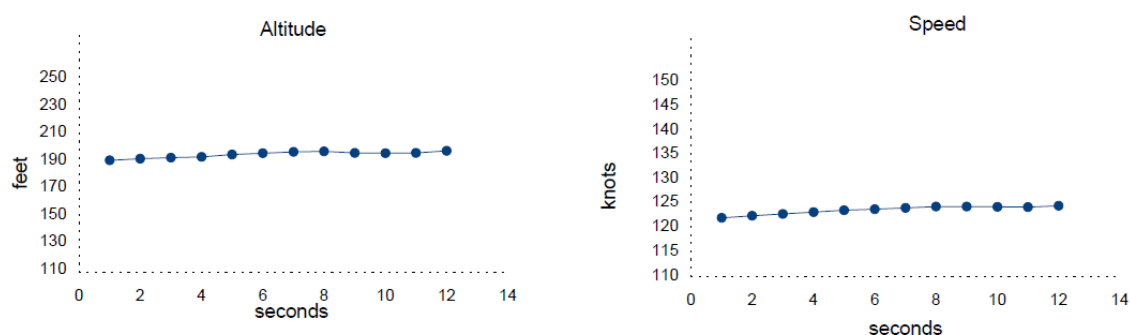


Figura 4.2.2.a: Gráficas de velocidad y altitud durante la descarga [21]

- **Descarga por cuartos**

El caso de descargas por cuartos, consistirá en descargar la cuarta parte en volumen de la capacidad del sistema MAFFS II. Dentro de esta tipología, existirán dos tipos de ajuste de dicha partición: Ajustes 1 y 2.

- **Cuarta parte con ajuste 1**

<b>Altitud de lanzamiento</b>	57 m	<b>Volumen lanzado</b>	3.365,23 l
<b>Velocidad del avión (<math>U_0</math>)</b>	225,95 km/h	<b>Caudal lanzamiento</b>	416,39 l/s

Tabla 4.2.2.c: Parámetros del ensayo de descarga [21]

Con dichos parámetros, se obtuvieron los siguientes valores de cobertura sobre la zona del impacto de descarga:

<b>Nivel de cobertura [GPC]</b>	<b>Área de cobertura [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Longitud de línea [m]</b>
1	4.540,64	491,64
2	1.428,38	350,52
3	69,97	45,72
4	5,85	3,96
6	0	0
8	0	0
10	0	0

Tabla 4.2.2.d: Resultados de cobertura del ensayo de descarga [21]

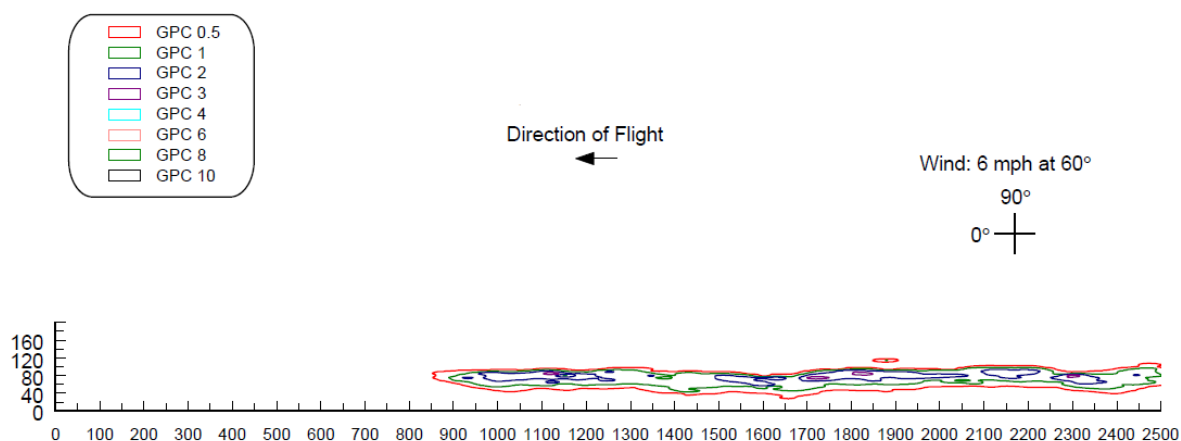


Gráfico 4.2.2.b: Distribución de descarga por niveles de cobertura, valores de los ejes en pies [21]

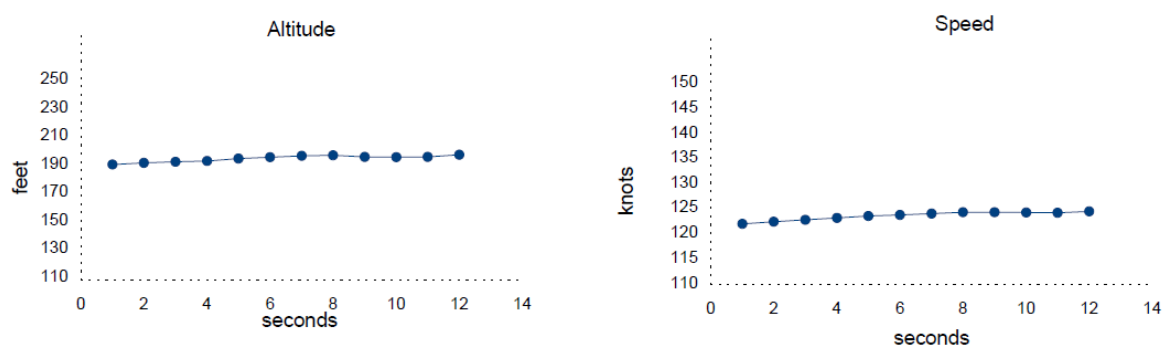
Con los resultados obtenidos, como se puede observar en la *tabla 4.2.2.d* y comparando con la esquematización del gráfico anterior, el anillo de mayor cobertura es el de  $GPC=0,5$ . El valor efectivo mayor de cobertura es el de nivel 1, de  $GPC=1$  que equivale a  $0,407 \text{ l/m}^2$  como se ha comentado anteriormente. Este hecho, supone que existe un anillo de cobertura en el caso del *gráfico 4.2.2.b* de color verde, con un área de  $4.540,64 \text{ m}^2$  que recibe  $0.407 \text{ l}$  de retardante por unidad de superficie. Dicho anillo de superficie recibe en total  $1.848 \text{ l}$  de retardante. Conforme se reduce el valor de  $\lambda$ , es decir, cuanto más cerca se analiza la cobertura respecto del eje longitudinal de la descarga, el nivel de cobertura aumenta llegando hasta un máximo de cobertura axial de 4 GPC, o de  $1,63 \text{ l/m}^2$ .

En comparación con la descarga por mitades, se puede observar que la cantidad de retardante que impacta en la superficie es lógicamente inferior, no solo debido a que se descarga la mitad de la anterior, sino que el caudal disminuye en  $200 \text{ l/s}$ , manteniendo los otros factores aproximadamente constantes. Al reducir este parámetro, se provoca una menor descarga de masa de retardante que puede llegar a causar una mayor dispersión y vaporización de retardante.

En esta modalidad de descarga se recuperaron  $3.175 \text{ litros}$ . A nivel porcentual, en los dos tipos de descarga, se pierde un  $5,6\%$  de volumen de retardante que se había lanzado.

También es interesante destacar las reacciones a nivel de manejo de la aeronave, como se observa en la *figura 4.2.2.b*, que en comparación con la descarga por mitades, al desprenderse

de la mitad de la carga anterior provoca un menor pico en la altitud de vuelo y como consecuencia hace este tipo de descarga más constante a nivel de vuelo.



*Figura 4.2.2.b:* Gráficas de velocidad y altitud durante la descarga [21]

#### — Cuarta parte con ajuste 2

Aunque el fabricante le otorgue el nombre de descarga de cuarta parte con ajuste 2, este tipo de descarga a nivel de volumen descargado sería la octava parte de la capacidad total del sistema *MAFFS II*. Con dicho ajuste y los siguientes parámetros:

<b>Altitud de lanzamiento</b>	62,18 m	<b>Volumen lanzado</b>	1.415,75 l
<b>Velocidad del avión (<math>U_g</math>)</b>	212,98 km/h	<b>Caudal lanzamiento</b>	499,67 l/s

*Tabla 4.2.2.e:* Parámetros del ensayo de descarga [21]

Con la configuración anterior, se obtuvieron los siguientes valores de cobertura sobre la zona del impacto de descarga:

<b>Nivel de cobertura [GPC]</b>	<b>Área de cobertura [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Longitud de línea [m]</b>
1	1.329,72	83,82
2	772,30	68,58
3	354,24	53,34
4	133,59	38,1
6	11,61	7,62
8	0	0
10	0	0

*Tabla 4.2.2.f:* Resultados de cobertura del ensayo de descarga [21]

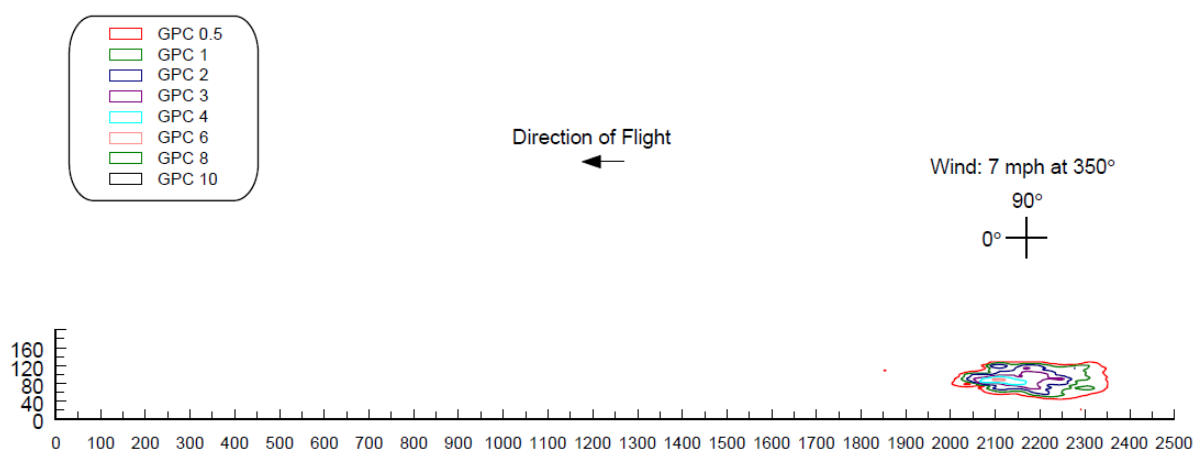


Gráfico 4.2.2.c: Distribución de descarga por niveles de cobertura, valores de los ejes en pies [21]

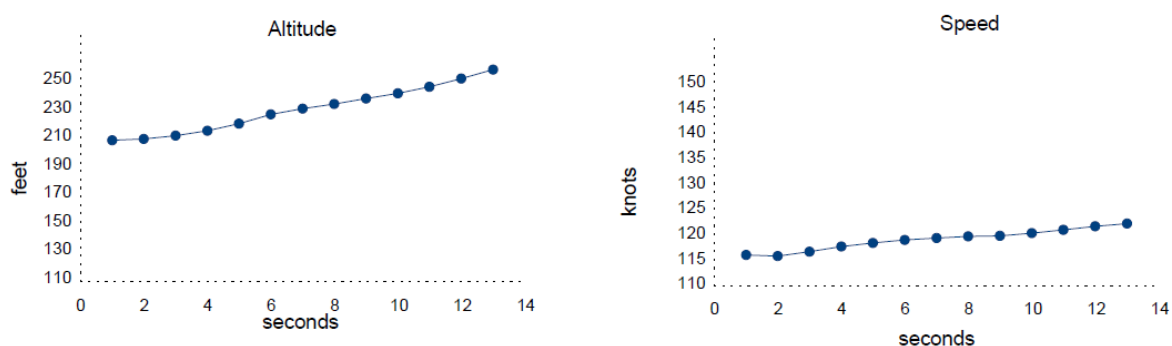
Con los resultados obtenidos, como se puede observar en la *tabla 4.2.2.f* y comparando con la esquematización del gráfico anterior, el anillo de cobertura mayor es el de  $GPC=0,5$ . El valor efectivo mayor de cobertura es el de nivel 1, de  $GPC=1$  que equivale a  $0,407 \text{ l/m}^2$  como se ha comentado anteriormente. Este hecho, supone que existe un anillo de cobertura en el caso del *gráfico 4.2.2.c* de color verde, con un área de  $1.329,72 \text{ m}^2$  que recibe  $0.407 \text{ l}$  de retardante por unidad de superficie. Dicho anillo de superficie recibe en total  $2937 \text{ l}$  de retardante. Conforme se reduce el valor de  $\lambda$ , es decir, cuanto más cerca se analiza la cobertura respecto del eje longitudinal de la descarga, el nivel de cobertura aumenta llegando hasta un máximo de cobertura axial de 6 GPC, o de  $2,45 \text{ l/m}^2$ .

Con este tipo de ajuste y su descarga resultante se puede establecer que este tipo de descarga destaca por su corta longitud pero gran factor de cobertura. Se puede observar, que el caudal es mayor al de la cuarta parte con ajuste 1, pero la duración de la descarga es inferior. Se podría calificar como una descarga corta pero compacta, ya que la superficie del impacto recibe un volumen  $1.336,25$  litros de retardante.

En este caso, el 5,6% del volumen descargado no se recupera en el suelo, debido a los mismos factores que se han comentado anteriormente. Se puede concluir entonces, que el 5% del volumen descargado se vaporiza y dispersa en las cercanías de la descarga.



También es interesante destacar las siguientes reacciones a nivel de manejo de la aeronave, como se observa en la *figura 4.2.2.c*, aunque sea la descarga con menor contenido desprendido, experimenta el mayor ascenso de las tres tipologías. En este caso, se atribuirá este suceso a la topografía del terreno y no al aumento de la fuerza de sustentación del avión.



*Figura 4.2.2.c:* Gráficas de velocidad y altitud durante la descarga [21]

Finalmente, se puede concluir, que el área cubierta por las descargas realizadas por éste sistema serán mayores que cualquiera de los sistemas existentes actuales, ya que todos los sistemas actuales que pertenecen al MAPAMA<sup>6</sup>, son sistemas de descarga por gravedad. Los sistemas de descarga por gravedad, se basan en accionar electroválvulas o compuertas que liberan el contenido a descargar por el efecto gravitatorio. Este tipo de sistema, permite que la descarga se focalice más en un núcleo de impacto y que la descarga sea menos dispersa. A su vez, cubre una superficie menor de impacto, con que su  $L$  y su  $\lambda^7$  son menores.

En cambio, el sistema *MAFFS II*, al ser un sistema presurizado y que su difusor esta encarado a la dirección opuesta del sentido de vuelo, permite que el alcance del retardante sea mayor con una mayor área de impacto por un factor de cobertura aceptable como se ha comentado con anterioridad.

<sup>6</sup> Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente

<sup>7</sup> Longitud transversal de la descarga o anchura

### 4.3 Creación del plan logístico de intervención

Para poder crear un plan logístico para el sistema *MAFFS II*, cabe recordar el propósito del estudio de viabilidad de este proyecto, que era ver si la incorporación de un sistema de extinción de incendios de grandes dimensiones como el *MAFFS II*, sin tener que realizar una gran inversión para adquirir un avión contra incendios nuevo de grandes dimensiones. Por este motivo se escogió el sistema *MAFFS II*, ya que el Ejército del Aire ya tiene en su posesión los aviones que cargan el sistema como se ha ido comentando a lo largo del trabajo, que son los *C-130*. Dichos aviones, tienen su base operativa en la base aérea de Zaragoza.

Para crear un plan logístico para que el sistema sea viable, se debe partir de la premisa que el sistema paletizado permanecerá almacenado en la base aérea de Zaragoza, y que una vez activado el protocolo *MAFFS II* se deberá cargar en uno de los *C-130*, siempre que estén disponibles en ese instante.

En todos los protocolos de otros países del sistema *MAFFS II*, el *C-130* va guiado por el llamado “lead plane”, o avión de guía; éste es el encargado de determinar el punto donde debe realizar la descarga el *C-130* ya que es el que está en contacto con el coordinador en tierra. El “lead plane”, se suele caracterizar por realizar pequeñas descargas de agua en el punto donde quiere que el piloto del *MAFFS II* realice la descarga, y lo guía en el camino de entrada y salida al fuego. En este caso, se cree oportuno con la formación y técnicas conjuntas aportadas por la unidad del 43 Grupo a los pilotos del *C-130* bastaría y no se requeriría del uso de un “lead plane”.

#### 4.3.1 Protocolo *MAFFS II*

En el desarrollo del protocolo de soporte, se distinguirán las siguientes fases:

- **Activación**

Partiendo de la base de que dicho protocolo sería como refuerzo de los medios aéreos ya existentes en el protocolo de actuación conjunto del MAPAMA y de que solo se activaría en ocasiones excepcionales, el protocolo *MAFFS II* se activaría en tres casos:

- Aquellos incendios que se consideran especialmente peligrosos e impredecibles por su alta velocidad de propagación y debido a altas rachas de viento, que son capaces de escapar a un ataque ampliado y exhaustivo por parte de los medios de extinción.
- Aquellos incendios cuya duración excede las 24 horas sin haber podido ser controlados por todos los medios contraincendios existentes en la zona.
- Todos los incendios que excedan una quema descontrolada mayor a 500 hectáreas de masa forestal.

Estas tres casuísticas, serán las que darán el poder al jefe operativo de emergencias al mando de las labores de extinción de solicitar el apoyo del *MAFFS II* y que calificarán al incendio que se trata de extinguir como gran incendio forestal.

- **Planificación**

En la fase de planificación, una vez activado el protocolo, se tratarán todas las labores organizativas, administrativas y técnicas para poder ejecutar el protocolo con éxito. Se deberá planificar cuál será la base o aeropuerto más cercano al incendio forestal dónde se solicite el apoyo. El máximo radio de acción del MAFFS II como se ha comentado con anterioridad es de 100 km, ya que sino sus labores serían casi contraproducentes provocando una cadencia de descargas ineficiente. A continuación se muestra en la *figura 4.3.1* el mapa de los aeropuertos y bases dónde el C-130 podría aterrizar repostar o reabastecerse de retardante con un radio máximo de 100 km desde la base.



*Figura 4.3.1: Mapa con aeropuertos y radios de acción inferiores a 100 km [elaboración propia]*

También se debería planificar a continuación de la selección de la base más próxima al incendio, las necesidades de fuel en kg para volar hasta la zona del incendio, realizar la primera descarga y aterrizar con seguridad en el aeropuerto designado como la base de operaciones para ese determinado incendio; a su vez la estimación de tiempo de respuesta para cada una de las localizaciones también deberá ser planificada. Como se ha comentado con anterioridad, el sistema *MAFFS II* se puede tener instalado en la bodega de carga del *C-130* en una hora, pero se estima que de media se puede tener cargado y listo para despegar en una hora y media.

Destino	Distancia [km]	tiempo respuesta [h]	Fuel [kg]
Lleida	126,64	2,02	847,01
Pamplona	127,81	2,02	853,73
Cuenca	153,31	2,08	946,26
Reus	167,38	2,04	873,11
Valencia	226,64	2,25	1.319,17
Barcelona	257	2,31	1.429,34
Burgos	258,91	2,31	1.436,27
Madrid	262,67	2,32	1.449,91
Bilbao	279,33	2,35	1.510,36
Gerona	311,36	2,42	1.626,59
Valladolid	321,84	2,44	1.664,62
Santander	328,16	2,45	1.687,56
Albacete	343,79	2,48	1.744,27
Palma de Mallorca	374,57	2,54	1.855,97
León	405,08	2,60	1.966,68
Salamanca	418,67	2,63	2.015,98
Ciudad Real	423,3	2,64	2.032,79
San Javier	444,8	2,68	2.110,81
Oviedo	466,22	2,73	2.188,54
Granada	502,57	2,80	2.320,44
Córdoba	557,4	2,91	2.519,41
Almería	572,58	2,94	2.574,49
Badajoz	619,08	3,03	2.743,23
Sevilla	625,64	3,04	2.767,03
Málaga	635,15	3,06	2.801,54
S. de Compostela	646,96	3,09	2.844,40
Vigo	661,38	3,12	2.896,72
<b>Media</b>	<b>389,56</b>	<b>2,57</b>	

*Tabla 4.3.1:* Resumen estimado de tiempos de respuesta

En la tabla anterior se muestra un resumen de dichos valores, donde el tiempo de respuesta engloba todo el tiempo que transcurre desde que se activa el protocolo hasta que se realiza la primera descarga.

Una vez seleccionado el aeropuerto o base de operaciones, se deberá solicitar no solo todos los permisos referentes a los planes de vuelo hacia esa zona de dicho espacio aéreo, sino que se deberá solicitar al cuerpo de bomberos de dicha base o zona operativa apoyo para crear la estructura de reabastecimiento temporal de retardante a largo plazo para poder reabastecer el sistema *MAFFS II* in situ y de la forma más rápida posible.

Para planificar dicha operación de reabastecimiento de retardante, el sistema *MAFFS II* necesitará en la rampa de estacionamiento de dicho aeropuerto los materiales ya mencionados en el *punto 3.6.4*, que se basará en una bomba centrífuga capaz de bombear 1.500 litros de retardante por minuto, desde una piscina de mezclado de retardante con agua con capacidad de hasta 16.000 litros como la que se muestra en la *figura 4.3.1.a*.



*Figura 4.3.1.a:* Piscina de mezcla de retardante a largo plazo<sup>8</sup>

El repostaje de combustible se realizará in situ en el aeropuerto de destino, cuando sea requerido por la tripulación del *C-130* en uno de sus circuitos ovals de descargas, a la vez que el reabastecimiento de retardante.

- **Ejecución**

A la hora de ejecutar el protocolo, se seguirán todas las premisas establecidas previamente. Cuando el *MAFFS II* despegue y esté en ruta se comunicará un TEL<sup>9</sup> al COA en la zona del incendio, para que puede planificar las descargas del *MAFFS II* dónde más se requieran para poder flanquear bien el frente del incendio.

---

<sup>8</sup> Fuente: *Vallfirest*, depósito colapsable

<sup>9</sup> Tiempo Estimado de Llegada

## 4.4 Simulación de una actuación del sistema MAFFS II

Para poder ver la efectividad del sistema MAFFS II, se propondrá un caso hipotético de actuación en un incendio que sucedió en Calcena, una localidad cerca de Zaragoza el 27 de Agosto de 2012, donde ardieron 4.674,11 hectáreas de masa forestal.

Dicho incendio contó con la colaboración de 17 medios aéreos, 171 cuadrillas forestales, 2 pelotones de la Unidad Militar de Emergencias y otros servicios de emergencias.

En la zona de estudio donde se simularía el efecto contra incendios del MAFFS II, es una zona que se caracteriza por dos tipos principales de vegetación [25]:

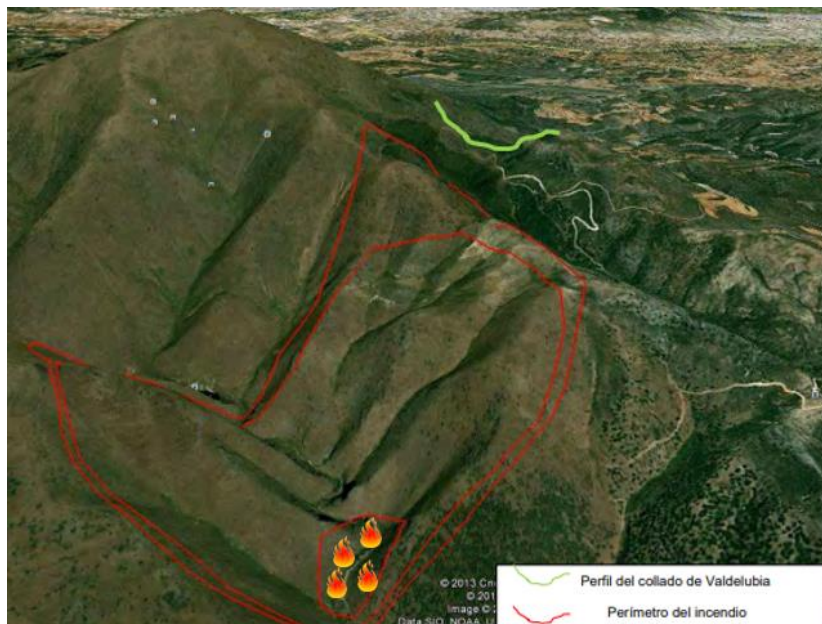
- **Tipo 1:** Pastizal adehesado de menos de 0,50 cm. de altura con presencia de matorral disperso de romero (*Rosmarinus officinalis*), aliaga (*Genista scorpius*), y tomillo (*Thymus vulgaris*) e incluso de porte arbóreo como encinas (*Quercus ilex sps rotundifolia*). Predomina en la zona de cola concretamente en el barranco de Valdeplata.
- **Tipo 2:** Pastizal de hasta 0,50 cm. de altura de con mayor presencia de matorral disperso de romero (*Rosmarinus officinalis*), aliaga (*Genista scorpius*), tomillo (*Thymus vulgaris*), enebro (*Juniperus oxycedrus*), coscoja (*Quercus coccifera*), etc que en el tipo 1. Se localiza en aquellas zonas del incendio en las que el tipo 1 ha incrementado carga de combustible con el paso de los años.

Como se ha comentado, para poder extinguir o contener un frente en este tipo de vegetación, se requeriría de un nivel de cobertura de entre 0,5 y 0,75 l/m<sup>2</sup> [1] de retardante.

El tipo de combustión de los dos tipos de combustibles en la zona de estudio, combustionarían de forma completa creando un a llama de entre 2 y 4 metros de altura y con una alta velocidad de propagación.

En la *figura 4.4.1* se puede observar un croquis del supuesto incendio, que procedería de la parte inferior del valle ascendiendo por la parte central del valle y ampliándose por las laderas de la montaña. Se considera también que el viento era ascendiente a favor de la cresta del valle.

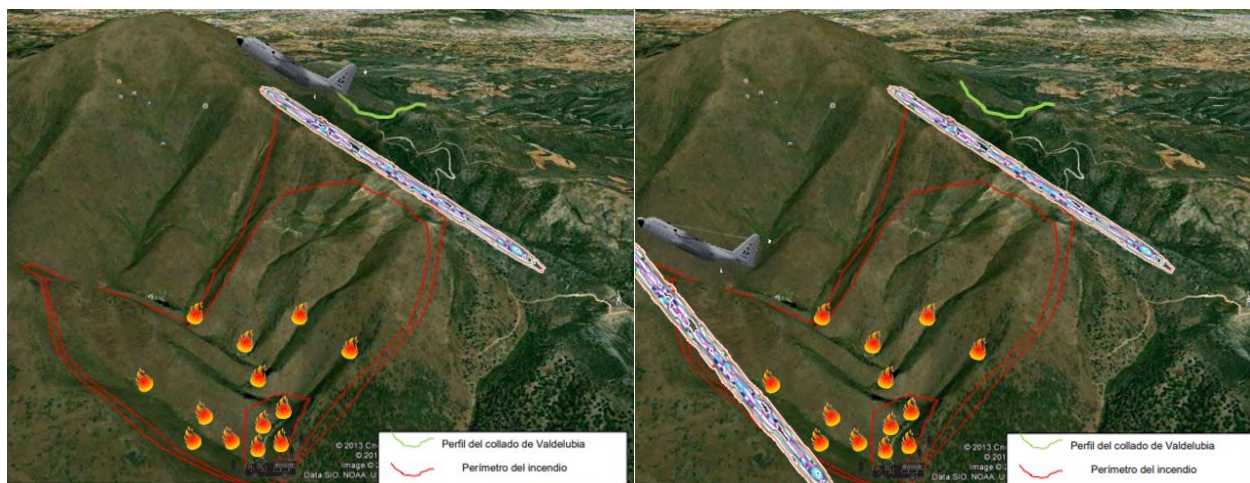




**Figura 4.4.1:** Fotografía del supuesto incendio a extinguir [elaboración propia]

Con el símil de la situación que sucedió en la realidad, sobre las 17:00 horas, el número de hectáreas quemadas ya superaba el límite de 500 establecido para solicitar el apoyo del *MAFFS II*. Con el tiempo de respuesta de carga del sistema de 1 hora y media, y con la corta distancia la localización, el sistema podría estar realizando la primera descarga de la mitad de su contenido en un tiempo de máximo 1 hora y cincuenta minutos.

La ubicación más eficiente de la primera descarga de 500 metros de longitud sería en el lado derecho de la cresta del valle como se ve en la *figura 4.4.1.a*. La segunda descarga que se podría realizar en un lapso de 5 minutos de diferencia, se realizaría en el costado izquierdo de la cresta del valle como se muestra en la *figura 4.4.1.b*.



**Figura 4.4.1.a, 4.4.1.b:** Fotografía del supuesto incendio a extinguir, 1ª y 2ª mitad descargadas [elaboración propia]



Estas dos descargas proporcionarían unos cortafuegos de aproximadamente 500 metros en cada costado del valle, evitando de este modo la propagación del incendio a las laderas colindantes de este valle. Al realizar dichas descargas con retardantes de largo plazo, se dotaría a las zonas de los respectivos impactos de descargas con un alto nivel de cobertura en los ejes longitudinales de la descarga como se comprobó en el *punto 4.2.2*, para así permitir a los efectivos terrestres conducir el fuego por el centro del valle y a los helicópteros poder realizar descargas en la parte superior del valle, cortándole el paso así al frente del incendio.

Con esta estrategia se podría extinguir un gran frente de propagación que fue en su día esta zona, previo a la puesta de sol, que es cuando los medios aéreos deben abandonar las labores de extinción por falta de visibilidad y es cuando más se complican las labores de extinción para los efectivos terrestres si el viento no amaina.

## **4.5 Impacto ambiental**

### ***4.5.1 Impacto ambiental del sistema MAFFS II***

El impacto ambiental es una de las formas de cuantificar como afectará la integración del sistema solución en el proceso de extinción de incendios respecto a los sistemas contraincendios actuales. En el caso del sistema *MAFFS II*, para poder establecer el impacto que tiene en el medio ambiente, se centrará el estudio en la nave portadora y las consecuencias del uso de la misma como medio de extinción contra incendios.

El impacto medioambiental debido a la aviación en general, hoy en día, es uno de los sectores con mayor emisión de gases que favorecen el efecto invernadero y el calentamiento global. También se caracteriza por ser un sector que emite gran cantidad de metales pesados como Pb, Hg y Cd entre otros por la combustión principal de *jet fuel o queroseno*. A estos factores, se le suma el exponencial aumento en el tráfico aéreo mundial debido a la incesante crecida de pasajeros y mercancías como se puede observar en la *figura 4.5.1*.

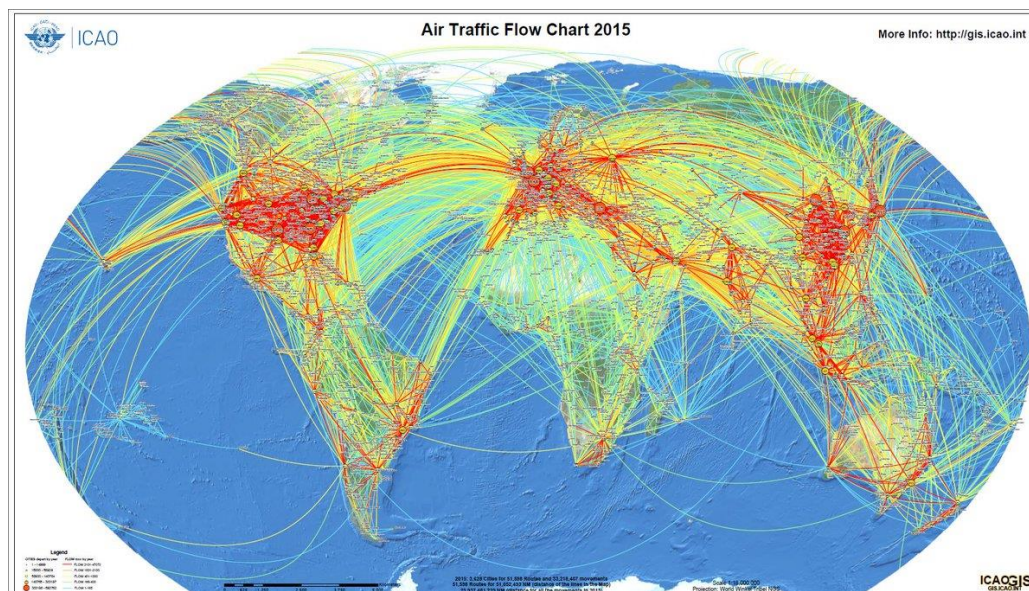
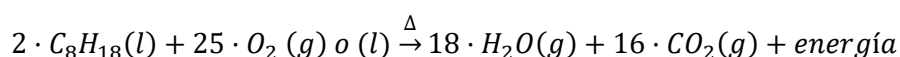


Figura 4.5.1: Mapa del tráfico aéreo mundial del año 2015<sup>10</sup>

El factor clave del impacto ambiental en este caso, será la combustión de combustibles fósiles asociado al uso de motores turbopropulsados por el C-130. En el caso de ésta aeronave, se usan cuatro motores turbohélices T-56 Allison con 4.910 CV cada uno.

Como en la mayoría de los casos de los motores turbohélices de estas dimensiones y la mayoría de motores de aviación se usa combustible el queroseno, conocido como jet fuel o JP8, con formula  $C_8-C_{18}$  y por sus propiedades como una temperatura de congelación de  $-47^{\circ}\text{C}$  y alta volatilidad lo hacen ideal para este propósito, siendo su reacción de combustión:



Se puede llegar al resultado de que por cada 1 kg de combustible quemado se liberan 2,11 kg de  $CO_2$  a la atmosfera. En el caso del C-130 con el sistema a bordo, se ha estimado un consumo de combustible por hora de 2.222,00 kg [30], que reportarían una emisión de 4.688,42 kg de  $CO_2$  a la atmosfera. Como valor orientativo, la emisión en kg por hora del coche más vendido en Europa es de 23,28 kg  $CO_2/h$ .

En comparación al avión de mayores dimensiones de extinción de incendios en España, el CI-415, anteriormente mostrado, con un consumo máximo de unos 1.028 kg fuel por hora en labores de extinción intensas, supondría una emisión de 2169,08 kg de  $CO_2$ .

<sup>10</sup> Fuente → ICAO: <http://gis.icao.int>

Se puede observar una gran diferencia entre el *C-130* y el *CI-415*, ya a nivel de emisiones como de consumo que principalmente es debido a que el *C-130* tiene una planta motora con el doble de propulsores con el doble de potencia en cada uno de sus propulsores. También se puede deber a que el valor estimativo de consumo por hora en el caso del *Hercules* es el valor máximo en cuanto se pone el avión bajo el máximo esfuerzo o exigiéndole el máximo rendimiento.

En el caso de los incendios forestales, la emisión de dichos kg de CO<sub>2</sub> a la atmosfera estaría justificados para promover la preservación de la masa forestal, que sería la responsable mediante la fotosíntesis de fijar parte de este dióxido de carbono emitido. La masa forestal de España asciende a 27,59<sup>11</sup> millones de hectáreas, de las que 18 millones son de superficie arbolada, siendo capaces de fijar cada año 87 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>. Cada hectárea que se pierde de superficie arbolada, es sinónimo de una disminución de una capacidad de fijar 3,15 toneladas de CO<sub>2</sub> por año por hectárea de masa forestal. Con una hora de labores de extinción del *C-130* con las condiciones estipuladas en el punto 4.1.2.1, se pueden llegar a cubrir 2,8 hectáreas de masa forestal, preservando un potencial de fijación de CO<sub>2</sub> equivalente de 9.103 kg anuales de dióxido de carbono, sin tener en cuenta el valor añadido que tiene dentro del ecosistema.

En este aspecto, los medios de extinción contra los incendios forestales, también son herramientas para evitar mayores emisiones de dióxido de carbono y otros componentes derivados de la combustión de masa forestal, ya que los incendios forestales son también los causantes de la emisión del 20%<sup>12</sup> del dióxido de carbono emitido por los humanos.

#### **4.5.2 Impacto ambiental de los retardantes a largo plazo**

En estudios medioambientales recientes sobre los efectos que tienen los retardantes a largo plazo cuando se aplican sobre la superficie forestal, se ha podido observar que los químicos usados en los incendios de las últimas décadas ha acabado desestabilizando el correcto crecimiento de determinadas especies arbóreas dentro de los ecosistemas, ya que alteran su fertilidad y perjudican a la biodiversidad; no solo ha influido en dicho desarrollo, sino que se

---

<sup>11</sup> Fuente: Dept. Sistemas y Recursos Forestales del INIA.

<sup>12</sup> Según el estudio de la Universidad de Tasmania, dirigido por David Bowman.

ha podido observar que los químicos usados se han filtrado a los arroyos próximos a las zonas de aplicación y han terminado en ecosistemas y recursos hídricos. Dichos químicos y sus efectos tóxicos han persistido durante diez años y han sido absorbidos por organismos vivos. [12]

Es por este motivo, por el cual también se ha realizado un estudio de mercado de todas las alternativas de retardantes a largo plazo para ser empleados por el sistema *MAFFS II*, llegando a un solo candidato que cumpliera que los efectos tóxicos que alteran el ecosistema no persistieran en el tiempo, después de su aplicación. El candidato seleccionado para cumplimentar dicho propósito, ha sido el *FL-02*, producto desarrollado por *Fire Limit*. Dicho producto se caracteriza por ser el primer retardante a largo plazo biodegradable y que en su composición química no incluye ningún tipo de polifosfato amónico, causante de los efectos tóxicos en los ecosistemas.

A nivel técnico, el producto fue testado por la Unidad Militar de Emergencias para ser incorporado en un futuro en su protocolo de extinción. También destaca por necesitar menor cantidad de producto para realizar la mezcla final, ya que necesita un 10% en volumen, mientras que con retardantes a largo plazo con base de polifosfatos amónicos es necesaria una mezcla de entre un 20 o 25% en volumen como se ha comentado con anterioridad. El coste del producto, en grandes cantidades es de 4,4€/l<sup>[30]</sup>, aunque con una correcta aplicación de las descargas, se pueden evitar rápidas propagaciones y pérdidas materiales.

Dicho producto, también destaca por no ser corrosivo, que reduciría el coste de mantenimiento del avión, ya que con los retardantes a largo plazo convencionales se debe realizar una limpieza exhaustiva del avión después de cada aplicación, para evitar problemas de corrosión en la estructura del mismo.

## **5. Análisis económico**

### **5.1 Estudio de mercado**

Para el mismo propósito de extinción de incendios forestales, con el uso de un *C-130* como nave portadora, solamente existe un sistema que se asemeja a las características del sistema *MAFFS II*. Dicho sistema también cumple los requisitos de ser un sistema modular con gran capacidad de carga y permite aprovechar los recursos ya existentes del Ejército del Aire como el *Hercules*.

Dicho sistema fue creado por *Coulson Aviation* bajo el nombre de *RADS XXL*. Se caracteriza por ser un sistema de descarga por gravedad con una capacidad de 13.240 litros <sup>[31]</sup> de retardante o agua. A nivel técnico, el tipo de descarga sería parecido a los de los *CL-215* y *CL-415* actuales del Ejército del Aire, ya que el sistema de descarga sería por el mismo principio.



*Figura 5.1.1:* Imágenes del *C-130* de *Coulson Aviation* con su sistema *RADS XXL* [31]

Este sistema, fue descartado desde un principio ya que cumplía el requisito de ser un sistema modular, pero para poder ser instalado, previamente se deben realizar unas modificaciones estructurales en el avión, para poder instalar las compuertas de descarga en la parte inferior o barriga del avión. Esta modificación entraría en conflicto con uno de los requisitos del proyecto, que es reconvertir uno de los aviones del Ejército del Aire sin modificarlos estructuralmente.

Por otro lado cabe remarcar, que de las aeronaves pertenecientes al Ejército del Aire, ninguna otra cumpliría los requisitos para ser reconvertida temporalmente con un sistema modular

para luchar contra los incendios forestales y que sea una aeronave de ala fija de gran capacidad de carga.

## 5.2 Presupuesto general

### 5.2.1 Costes de adquisición del sistema

Para poder comparar si el sistema solución es viable económicamente, se realizará la comparación del coste de adquisición del sistema *MAFFS II* con el coste del *RADS-XXL* <sup>[31]</sup> de Coulson, simplemente a nivel estimativo con el IVA incluido.

Concepto	<i>MAFFS II</i> [€]	<i>RADS-XXL</i> [€]
Coste de adquisición	5.100.000	3.435.800
Coste de modificaciones para habilitar el uso del sistema	0	1.525.000
Coste de Mantenimiento	incluido	incluido
Coste de formación	incluido	incluido
<b>TOTAL</b>	<b>5.100.000</b>	<b>4.960.800</b>

*Tabla 5.2.1:* Tabla resumen de costes estimativos de adquisición [elaboración propia]

Como se puede observar en la *tabla 5.2*, a nivel estimativo de costes de adquisición, los dos sistemas tienen un coste inicial parecido. El coste inicial del *MAFFS II* es más elevado debido a que es un sistema más complejo, ya que está equipado con unidades de potencia, compresores de aire y tecnologías más avanzadas que en el caso del sistema *RADS-XXL*.

En el caso del *RADS-XXL*, se debe realizar una modificación inicial del avión con un coste elevado debido a costes de material adicional y de unas 35.000 horas de mano de obra humana especializada para habilitar el avión para usar el sistema, sin tener en cuenta el coste de material que se requiera dependiendo del estado del avión.

En ambos casos, las empresas que comercian con los dos sistemas dan apoyo logístico y de mantenimiento del sistema en sí de entre 5 y 10 años, aportando también una corta fase de formación de los pilotos en el sistema. En ambos casos, los pilotos de *C-130* deberían realizar una formación extra de aproximadamente 15 horas prácticas en descargas con el sistema.

En ambos casos, los pilotos del *C-130* recibirían una formación extra por parte del 43 Grupo de las Fuerzas Aéreas, unidad encargada de la extinción de incendios mediante aviones anfibios del tipo *Canadair CL-215T* y *CL-415*. Con dicho entrenamiento, se podría llegar a prescindir del anteriormente mencionado “lead plane” o avión guía, para así reducir costes de explotación.

### 5.2.2 Costes del estudio de viabilidad

Para el desarrollo del estudio de viabilidad realizado, se han destinado 320 horas por parte de un ingeniero junior bajo la supervisión de un jefe de proyecto y una dedicación de 15 horas.

Concepto	Coste	Unidades	Importe [€] (con IVA)
Salario ingeniero junior	30 [€/hora]	320 horas	9.600
Salario jefe proyecto	55 [€/hora]	15 horas	825
Material de investigación	30€/ud	3	90
Desplazamientos	150 €/despl.	2	300
<b>TOTAL</b>			10.815

*Tabla 5.2.2:* Tabla resumen de costes del estudio [elaboración propia]

Este total de costes por parte del desarrollo del estudio técnico, se añadirá más adelante al coste total del proyecto *MAFFS II*.

## 5.3 Costes de implementación del proyecto *MAFFS II*

Para poder estimar los costes de implementación del proyecto, se estudiará el coste de adquisición y el coste de explotación, que en este caso se podrá estudiar como el coste asociado a cada descarga realizada por el sistema *MAFFS II*.

### 5.3.1 Coste del sistema por depósito descargado

Para estimar el coste que puede llegar a suponer la incorporación del sistema, se deberá realizar una estimación del coste que supone un ciclo de descargas del sistema *MAFFS II*, incluyendo todos los gastos del proceso.

Será necesario distinguir entre los tipos de descarga y la distancia de la base al fuego, donde el gasto en retardante y combustible dependerá de estos dos factores. En las siguientes tablas resumen, se pueden observar las tablas comparativas de coste del sistema, donde el coste por litro de retardante es de 4,4 €<sup>[33]</sup> y el coste del avión es de 5.200 €/hora<sup>[36]</sup>.

Este coste incluye el coste de mantenimiento, coste de los pilotos y combustible. El coste del combustible, suponiendo un consumo medio de 2.777,5 litros<sup>[30]</sup> de *JP8* a la hora, supone un coste de 1.100,607 €/h, que es el 21% del coste total del avión por hora.

Es necesario remarcar, que dicho coste por hora del *C-130*, es el obtenido al estipular que el Ejército del Aire subarrendaría el avión a la Unidad Militar de Emergencias y que por ser un organismo del Ministerio de Defensa obtendría este precio. En cualquier otro caso, si fuera otro el organismo solicitante del servicio, el coste del avión sería de 10.410,37 €.

Alcance [km]	Descargas/hora	Coste/hora	Coste retardante [€]	Coste descarga [€]
10	3,08	3.380,00	8.644,31	3.907,90
20	2,67	3.900,00	7.491,73	4.271,90
30	2,54	4.087,20	7.148,60	4.415,67
40	2,43	4.274,40	6.835,52	4.566,18
50	2,33	4.461,60	6.548,72	4.723,43
60	2,24	4.648,80	6.285,01	4.887,41
70	2,15	4.836,00	6.041,72	5.058,14
80	2,07	5.023,20	5.816,56	5.235,61
90	2,00	5.210,40	5.607,58	5.419,81
100	1,93	5.397,60	5.413,10	5.610,75
<b>MEDIA</b>	<b>2,34</b>	<b>4.521,92</b>	<b>6.583,29</b>	<b>4.809,68</b>

*Tabla 5.3.1.a:* Tabla resumen de costes descargas por mitades [elaboración propia]



Alcance [km]	Descargas/ hora	Coste/hora	Coste retardante [€]	Coste descarga [€]
10	6,15	3.380,00	9.111,38	2.029,85
20	5,33	3.900,00	7.896,53	2.211,85
30	5,09	4.087,20	7.534,86	2.283,73
40	4,87	4.274,40	7.204,87	2.358,99
50	4,66	4.461,60	6.902,56	2.437,61
60	4,47	4.648,80	6.624,61	2.519,61
70	4,30	4.836,00	6.368,17	2.604,97
80	4,14	5.023,20	6.130,85	2.693,70
90	3,99	5.210,40	5.910,58	2.785,81
100	3,85	5.397,60	5.705,59	2.881,28
<b>MEDIA</b>	<b>4,69</b>	<b>4.521,92</b>	<b>6.939,00</b>	<b>2.480,74</b>

*Tabla 5.3.1.b:* Tabla resumen de costes descargas por cuartos [elaboración propia]

Alcance [km]	Descargas/hora	Coste/hora	Coste retardante [€]	Coste descarga [€]
10	12,31	3.380,00	7.662,77	897,23
20	10,67	3.900,00	6.641,07	988,23
30	10,18	4.087,20	6.336,90	1.024,17
40	9,73	4.274,40	6.059,37	1.061,79
50	9,32	4.461,60	5.805,13	1.101,11
60	8,95	4.648,80	5.571,36	1.142,10
70	8,60	4.836,00	5.355,70	1.184,79
80	8,28	5.023,20	5.156,11	1.229,15
90	7,98	5.210,40	4.970,86	1.275,20
100	7,71	5.397,60	4.798,46	1.322,94
<b>MEDIA</b>	<b>9,37</b>	<b>4.521,92</b>	<b>5.835,77</b>	<b>1.122,67</b>

*Tabla 5.3.1.c:* Tabla resumen de costes descargas por octavos [elaboración propia]

Como se puede observar, en los tres casos, el coste de retardante es el factor que aumenta más el coste por descarga, ya que a mayor cantidad de retardante descargada mayor será el coste total de la operación.

### 5.3.2 Análisis de costo-efectividad

En el caso de este proyecto, para poder determinar la viabilidad económica del sistema *MAFFS II* se comparará el coste que tiene cubrir un área de retardante con dicho sistema. Se partirá de las mismas suposiciones que en los apartados anteriores y se distinguirá entre los tres tipos de descargas.

Alcance [km]	Coste por hora [€]	Área cubierta [m <sup>2</sup> ]	[€/m <sup>2</sup> ]
10	12.024,31	22.207,54	0,541452
20	11.391,73	19.246,53	0,591885
30	11.235,80	18.365,01	0,611805
40	11.109,92	17.560,71	0,632658
50	11.010,32	16.823,89	0,654445
60	10.933,81	16.146,42	0,677166
70	10.877,72	15.521,4	0,700821
80	10.839,76	14.942,96	0,725409
90	10.817,98	14.406,09	0,750931
100	10.810,70	13.906,45	0,777387
<b>MEDIA</b>	<b>11.105,21</b>	<b>16.912,7</b>	<b>0,667</b>

Tabla 5.3.2.a: Tabla resumen de eficiencia coste descargas por mitades [elaboración propia]

Alcance [km]	Coste por hora [€]	Área cubierta [m <sup>2</sup> ]	[€/m <sup>2</sup> ]
10	12.491,38	27.942,4	0,447041
20	11.796,53	24.216,75	0,487123
30	11.622,06	23.107,58	0,502954
40	11.479,27	22.095,57	0,519528
50	11.364,16	21.168,48	0,536844
60	11.273,41	20.316,06	0,554901
70	11.204,17	19.529,63	0,573701
80	11.154,05	18.801,82	0,593243
90	11.120,98	18.126,31	0,613527
100	11.103,19	17.497,65	0,634553
<b>MEDIA</b>	<b>11.460,92</b>	<b>21.280,23</b>	<b>0,55</b>

Tabla 5.3.2.b: Tabla resumen de eficiencia coste descargas por cuartos [elaboración propia]

Alcance [km]	Coste por hora [€]	Área cubierta [m <sup>2</sup> ]	[€/m <sup>2</sup> ]
10	11.042,77	16.365,78	0,674747
20	10.541,07	14.183,68	0,743183
30	10.424,10	13.534,05	0,770213
40	10.333,77	12.941,31	0,79851
50	10.266,73	12.398,32	0,828074
60	10.220,16	11.899,06	0,858905
70	10.191,70	11.438,45	0,891003
80	10.179,31	11.012,17	0,924369
90	10.181,26	10.616,53	0,959001
100	10.196,06	10.248,32	0,9949
<b>MEDIA</b>	<b>10.357,69</b>	<b>12.463,77</b>	<b>0,84</b>

Tabla 5.3.2.c: Tabla resumen de eficiencia coste descargas por octavos [elaboración propia]

Con este análisis de costo-efectividad, también se puede llegar a la conclusión, de que el tipo de descarga más adecuado para optimizar el coste de descarga maximizando el área cubierta con retardante es el tipo de descarga por cuartos de depósito, ya que es el que cubre mayor área y con menor coste total por uso del sistema por hora.

### 5.3.3 Potencial económico de extinción

Con el fin de determinar el potencial económico de extinción o la comparación entre el coste que supone que una hectárea de masa forestal arada en comparación a una hora de vuelo de actuación del MAFFS II.

En España, para poder cuantificar el coste que supone una hectárea de masa forestal quemada, se considera un promedio entre los posibles potenciales económicos que tendría dicha hectárea; ya sea por cultivo de madera, de resina, el coste de extinción o el coste medioambiental de toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas a la atmosfera según el coste de las mismas en el mercado mundial de emisiones. Si consideramos una media de 150.000 hectáreas quemadas anualmente significa un gasto de 4.000€/ha, una cifra que habría que añadir a la valoración de pérdidas que establece el Ministerio de Medio Ambiente, que como ya apuntamos asciende a unos 2.000€/ha [34]. Entonces, el total de pérdidas económicas ascendería a 6.000€ por hectárea de masa forestal quemada.

Alcance	Coste extinción [€]	Área cubierta [ha]	Coste pérdidas evitadas [€]	Ratio pérd./coste
10	12.491,38	2,79	16.765,44	1,34
20	11.796,53	2,42	14.530,05	1,23
30	11.622,06	2,31	13.864,55	1,19
40	11.479,27	2,21	13.257,34	1,15
50	11.364,16	2,12	12.701,09	1,12
60	11.273,41	2,03	12.189,64	1,08
70	11.204,17	1,95	11.717,78	1,05
80	11.154,05	1,88	11.281,09	1,01
90	11.120,98	1,81	10.875,78	0,98
100	11.103,19	1,75	10.498,59	0,95
<b>MEDIA</b>	<b>11.460,92</b>	<b>2,13</b>	<b>12.768,14</b>	<b>1,11</b>

*Tabla 5.3.3.a:* Tabla resumen de eficiencia coste descargas por cuartos [elaboración propia]

Como en el apartado anterior se ha determinado que el tipo de descarga más eficiente sería la de descargas por cuartos de depósito, el ratio de € de pérdidas por hectáreas quemadas entre el coste de extinción en este caso es mayor a 1 de media, con que para esta tipología de descargas sería oportuno realizar la inversión de usar el sistema *MAFFS II* ya que se evitan unas pérdidas mayores al coste de su extinción.

En las otras dos tipologías de descarga, en la de 1/8 de depósito el ratio resultaba de 0,72 y el de ½ de depósito resultaba de 0,91. En el caso por mitades está cerca del 1, con que quizás para casos estratégicos de supresión sí que resultaría útil como en el análisis del *punto 4.4*, en cambio para el caso de octavos sería contra productivo usar el sistema *MAFFS II*.

#### 5.3.4 Comparación de costes con el sistema actual

Actualmente, como se ha comentado con anterioridad, los medios aéreos de ala fija con mayor capacidad de extinción de los que dispone España son los *Canadair* del 43 Grupo de las Fuerzas Aéreas.

Alcance [km]	<i>MAFFS II</i> [l/h]	<i>CL-215T</i> [l/h]	$\Delta$ Coste [€/h]
10	20.707,69	32.076	-4.072,06
20	17.946,67	29.723,76	-3.731,92
30	17.124,68	27.371,52	-2.871,41
40	16.374,70	25.019,28	-1.979,22
50	15.687,65	22.667,04	-1.059,33
60	15.055,93	20.314,8	-115,10
70	14.473,12	17.962,56	850,65
80	13.933,75	15.610,32	1.835,51
90	13.433,13	13.258,08	2.837,42
100	12.967,24	10.905,84	3.854,62
<b>MEDIA</b>	<b>15.770,46</b>	<b>21.490,92</b>	<b>-445,08</b>

*Tabla 5.3.4:* Tabla comparativa costes *MAFFS II* y *CL-215T* [Elaboración propia]

Como se puede observar en la *tabla 5.3.4*, En la variación de costes de extinción por hora, los valores que resultan con signo negativo, es debido a que la diferencia de coste es menor por parte del *CL-215T*. En el caso de distancias a la base mayores de 60 km, el sistema *MAFFS II* sería más eficiente que el *Canadair* mediante descargas de cuartos de depósito.

También es necesario remarcar, que el *Canadair* será mucho más eficiente que el sistema *MAFFS II* en distancias cortas a la base debido a su bajo tiempo de reabastecimiento de agua si existe una reserva hídrica cerca del incendio, ya que es capaz de llenar su depósito de 5.346 litros en 12 segundos, mientras que el sistema *MAFFS II* al tener que reabastecerse en una base tarda aproximadamente 15 minutos en reabastecerse de retardante. Esta diferencia de tiempo en distancias cercanas al incendio hace del *Canadair* de la opción óptima para extinguir fuegos.

## **6. Conclusiones**

A lo largo de este estudio de viabilidad, se ha llevado a cabo una introducción básica al mundo de la ingeniería de prevención y extinción de incendios forestales, relacionándola con la operativa de extinción de incendios del protocolo de extinción del MAPAMA; de esta forma se creaba una base suficiente para llegar a comprender la compleja metodología para extinguir un incendio forestal, ya que a niveles de estudio tanto sea en relación a flujos de calor, entalpías de combustión de entre tantos otros parámetros son sistemas difíciles de estudiar por su alta inestabilidad.

Uno de los principales objetivos del estudio, era ver si entre las alternativas para extinguir incendios actuales sería viable añadir un sistema con gran capacidad de carga de retardante o agua, ya que en España no ha habido hasta el momento ningún sistema con estas características. Esta propuesta, vino motivada por los recientes incendios forestales durante el verano de 2017 en Galicia y Portugal, que se clasificaron como desastres naturales.

En este tipo de casuística, con frentes tan grandes y descontrolados, se ha podido concluir en el estudio realizado que a nivel técnico para dirigir frentes hacia determinados puntos o para acorralarlos, que el sistema *MAFFS II* sería de gran ayuda debido a su gran capacidad de 11.350 litros de retardante y sobre todo a su método de dispersión de carga llegando a cubrir hasta aproximadamente 3 hectáreas de masa forestal con retardante por hora; al ser un sistema presurizado, al descargar el retardante, éste seguía una dispersión transversal mayor proporcionando un nivel de cobertura adecuado en casos donde la vegetación fuera matorral de 1,5 metros de altura hasta 2,5 metros.

En general, se ha podido concluir, que el sistema *MAFFS II* es una gran herramienta no solo para extinguir fuegos sino que para crear cortafuegos extensos y con buenos niveles de cobertura con retardante a largo plazo, que dotaba a la línea de aplicación de entre aproximadamente 500m de largo en el caso más extenso, un alto valor resistivo contra el frente del fuego, siendo su nivel óptimo de descargas de cuartos de depósito del sistema o de 3.365 litros descargados.

A nivel de estrategia conjunta, se ha podido determinar que el sistema sería el encargado de crear cortafuegos, mientras los otros medios de ala fija y rotativa se encargarían de sofocar los frentes secundarios y de extinciones directas.

A nivel económico, se ha podido concluir que el sistema *MAFFS II* no sería viable como avión de extinción de incendios únicamente, es decir, que solo se extinguieran incendios con dicho sistema, debido a su elevado consumo de 2.777 l/h combustible y coste por descarga, pero sobre todo por tener que volver a reabastecerse a una base con ciclos de reabastecimiento de 15 minutos de media.

También se ha podido determinar que a nivel económico, que dentro de un plan conjunto de extinción, el sistema *MAFFS II* sí que sería viable, y con su uso como medida excepcional en incendios que se consideren como descontrolados, que lleven ardiendo más de 24 horas o que hayan quemado más de 500 hectáreas, siendo el coste total de la incorporación del sistema de 5.110.815 €, que supondría el 6,5% del total que se destinará a la extinción de incendios de 2018.

Como posibles futuras vías de investigación sobre la implementación de sistemas de gran capacidad de extinción al protocolo de extinción de España, sería interesante desarrollar un sistema que permitiera reabastecer al sistema *MAFFS II* de retardante sin tener que aterrizar en una base y aumentando así la cadencia de sus descargas.

Finalmente sería oportuno, analizar la viabilidad de desarrollar un hidroavión con gran capacidad de carga, ya que como se ha observado en este estudio, con grandes reservas hídricas cerca de los incendios forestales, los hidroaviones con capacidad de reabastecerse de agua amerizando en dichas reservas son la opción más adecuada para este propósito.

## **7. Agradecimientos**

Me gustaría agradecer el apoyo, la predisposición y la información que he recibido por parte de la empresa *Fire limit* y Javier Fúnez, sobre sus amplios conocimientos en referencia a retardantes de llama.

También me gustaría agradecer la ayuda y el consejo recibido por parte del Teniente Coronel Juan Soriano Paradinas de la Sección de Operaciones Aéreas del Cuartel General de la Unidad Militar de Emergencias, al Teniente Coronel del Ejército del Aire José Luís Allo, al Teniente Coronel José María Santé Abal al mando del 43 Grupo del Ejército del Aire, a mi tutor Jordi Bou y en especial al Teniente Coronel Juan Domínguez.





## **8. Bibliografía**

- [1] Caamaño, J., Quílez, R., Hernández, E., Espadas, J.J., Enríquez, J.J., Borderas, F., i Aguado, B., *Operaciones Aéreas en Incendios Forestales*, Pau Costa Foundation, 1a ed., Primavera 2014.
- [2] Bombardier Canadair CL215 History, <http://www.bombardier.com/en/aerospace/amphibious-aircraft/history.html>, (Buscado en: Marzo 2018) [Online].
- [3] Gobierno de España, *Los incendios forestales en España, decenio 2001-2010*, Madrid, 2012
- [4] Gobierno de España, *Los incendios forestales en España, decenio 1996-2005*, Madrid, 2007
- [5] Gobierno de España, *Los incendios forestales en España, año 2014*, Madrid, Junio 2017
- [6] *Portable Airborne Firefighting and Sensing System*. U.S Cl. 169/51, US 2006/0260826 A1. 23 noviembre 2006.
- [7] USDA Forest Service MAFFS Q&A, *Modular Airborne Fire Fighting Systems (MAFFS) Training*, 23 Abril 2005
- [8] *C-130 Hercules Airtanker*, Octubre 2012. <http://www.marsaly.fr/fred/c-130-hercules-airtanker/>, (Buscado en: Marzo 2018) [Online].
- [9] FY13 Department of Defense Appropriations, *Analysis of H.R. 5856, the Fiscal Year 2013 Defense Appropriations Act.* , 2 Agosto 2012
- [10] Estadísticas de incendios Forestales, [http://www.mapama.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/Incendios\\_default.aspx](http://www.mapama.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/Incendios_default.aspx), (Buscado en: Abril 2018) [Online].
- [11] Gobierno de España, *Protocolo de actuación del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente*, 19 Junio de 2015

- [12] A.Couto Vázquez. [2011]. *El ciclo del N en sistemas agroforestales: Evaluación isotópica ( $^{15}\text{N}$ ) en tres tipos de manejo*. Universidad de Santiago de Compostela. Memoria para optar al doctorado en Biología
- [13] R. Ayats López. [2015]. *Projecte d'un avió contra incendis amfibi*. Universitat Politècnica de Catalunya. Trabajo fin de carrera.
- [14] NASA, monitorización de incendios forestales (FIRMS). <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms>, (Buscado en: Marzo 2018) [Online].
- [15] Real Decreto 750/2014, Boletín Oficial del Estado, Madrid, España, Julio 2014.
- [16] Arnaldos, J., Navalón, X., Pastor, E., Planas, E., Zárate, L., *Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios*, Ediciones Mundi-Prensa, 2003
- [17] "Briefing" sobre el sistema MAFFS, *601st Air Operations Center Air Mobility Division*, 25 Octubre 2007
- [18] Legendre, Dominique and Becker, Ryan and Alméras, Elise and Chassagne, Amélie, *Air tanker drop patterns*. (2013) International Journal of Wildland Fire. ISSN 1049-8001
- [19]<http://obeattie.github.io/gmaps-radius/?lat=51.500358&lng=-0.125506&z=10&u=mi&r=5>  
Herramienta para trazar alcances, (Buscado en: Mayo 2018) [Online]
- [20] <http://wildfiretoday.com/2010/10/01/comparisons-of-air-tanker-drop-patterns/>  
*Air tanker drop pattern comparisons*, San Dimas Technology Development Center, (Buscado en: Mayo 2018) [Online]
- [21] [https://www.fs.fed.us/t-d/programs/wfcs/delivery/documents/Settings\\_1\\_2.pdf](https://www.fs.fed.us/t-d/programs/wfcs/delivery/documents/Settings_1_2.pdf), *C-130 MAFFS II drop pattern*, (Buscado en: Abril 2018) [Online]
- [22] William Daub, G., William S. Seese, *Basic Chemistry* Prentice, Hall Inc. A Simon & Schuster Company, 1996

[23] G. Alonso Rodrigo, A. Benito Ruiz de Vila. *El impacto del transporte aéreo y las medidas para mitigarlo*. Universidad Politécnica de Madrid, España.

[24] <http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos/article/viewFile/7419/7342>  
*Análisis comparativo medios aéreos del MAPAMA*, (Buscado en: Marzo 2018) [Online]

[25] Grupo de Apoyo al Director de Extinción de Incendios Forestales (GADEX) , *INFORME TÉCNICO DEL INCENDIO FORESTAL DE CALCENA DE 27 DE AGOSTO DE 2012 (4.674,11 has) ,27 de Agosto de 2012* (Zaragoza)

[26] <https://www.flickr.com/photos/heli3/> *Eurocopter potos*, (Buscado en: Marzo 2018) [Online]

[27] Blanco, J., García,D., Castellnou, M., Molina,D.,Grillo, F., Pous,E. ,*Curso Básico de Incendios Forestales*, Noviembre 2008

[28] <http://wildfiretoday.com/tag/maffs/page/9/>, *MAFFS II System*, (Buscado en: Mayo 2018), [Online]

[29] <http://www.stratag-inc.com/projects/>, *C-130 MAFFS II Resource Strategic Project* , (Buscado en: Abril 2018), [Online]

[30] Estado Mayor del Ejército del Aire, División de logística, Sección de Recursos Financieros, *Media consumo combustible aeronave*, 2013

[31] <http://www.coulsonaviationusa.com/>, *Sistema RADS XXL de Coulson Aviation* , (Buscado en: Junio 2018) [Online].

[32] *Informe del departamento de protección, del centro de investigación forestal de Lourizán sobre la quema de demostración de la efectividad del agente extintor del fuego (Retardante de largo plazo) "FIRELIMIT" de la empresa "RIO SAGRADO S.L.", 11 de Marzo de 2011*

[33] Luís Moita, Salvador de Pinho Ferreira Almeida, *Demonstração de aplicação do producto FL-02*, 4 Abril 2011

[34] Sigfredo F. Ortuño Pérez, José L. Fernández-Cavada Labat, *Evaluación económica de los daños por incendios forestales*, Sevilla, 2007

[35] Ministerio de Defensa, *Presupuesto del Ministerio de Defensa*, Madrid, Setiembre 2017

[36] Cuartel General del Estado Mayor, División Logística, *Importes de la hora de vuelo de los sistemas de armas del E.A.*, Madrid, 2013

[37] J.C. Mérida Fimia, J. J. Gallar Pérez-Pastor, A. Muñoz Correal y E. Primo González, *COMPARACIÓN DE LA EFICACIA DE LAS DISTINTAS AERONAVES UTILIZADAS EN ESPAÑA PARA EL LANZAMIENTO DE AGUA EN EL COMBATE DE INCENDIOS FORESTALES*, 2005